

Практическая работа № 1

Построение электромеханической и механической характеристики АД

Цель работы: Закрепить теоретические знания по определению свойств электродвигателей электроприводов по их механическим характеристикам. Освоить методику расчета механических характеристик электроприводов в двигательном режиме.

Методические указания

Электропривод с трехфазным асинхронным двигателем (АД) является самым массовым видом привода в промышленности, коммунальном и сельском хозяйстве. В настоящее время АД применяется и в тяговых ЭП. Определяется это, в первую очередь, простотой изготовления и эксплуатации АД, меньшим по сравнению с ДПТ массой, габаритными размерами, стоимостью, а также высокой надежностью в работе.

Трехфазный АД имеет обмотку статора, подключаемую к трехфазной сети переменного тока с напряжением U_1 и частотой f_1 , обмотку ротора, которая может быть выполнена в двух вариантах. Первый вариант предусматривает выполнение обмотки ротора аналогично обмотке статора из проводников с выводами на три контактных кольца. Такая конструкция соответствует АД с фазным ротором (рис. 1, а), что позволяет включать в роторную цепь различные электротехнические элементы, например, резисторы для регулирования скорости, тока и момента ЭП.

Второй вариант – это выполнение обмотки ротора путем заливки расплавленного алюминия в пазы сердечника магнитопровода ротора, в результате чего образуется конструкция обмотки, известная под названием «беличья клетка». Схема АД с такой обмоткой ротора, не имеющей внешних выводов и получившей название короткозамкнутой, представлена на рис. 1, б.

В асинхронном двигателе электрическая мощность P_1 , потребляемая от сети переменного тока, преобразуется в механическую мощность P_2 , отдаваемую нагрузке на валу двигателя. Под действием приложенного к обмотке статора АД переменного напряжения U_1 по ней протекает ток I_1 , реактивная составляющая которого I_μ создает вращающий магнитный поток Φ . Этот поток наводит в короткозамкнутой обмотке ротора ЭДС E_2 , обуславливающую в ней ток I_2 . Взаимодействие тока в обмотке ротора I_2 с потоком Φ создает вращающий магнитный поток.

Угловая скорость вращения ротора АД Ω определяется по формуле

$$\Omega = \omega_1(1 - s),$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1/p_n$ – угловая скорость вращения магнитного поля, создаваемого током I_μ ;

f_1 – частота питающего напряжения;

p_n – число пар полюсов АД;

s – скольжение АД, определяемое выражением

$$s = (\omega_1 - \Omega)/\omega_1.$$

Скольжение – это величина, которая показывает, насколько скорость вращения магнитного поля опережает скорость вращения ротора.

Для асинхронного двигателя существуют два типа электромеханических характеристик:

– $I_1(s)$ – ток статора от скольжения;

– $I_2'(s)$ – ток ротора от скольжения.

Электромеханическая характеристика $I_2'(s)$ АД описывается выражением:

$$I_2'(s) = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_{к.з}^2}},$$

где $x_{к.з.} = x_1 + x_2'$ – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания фазы АД;

x_1 и x_2' – соответственно индуктивные сопротивления от потоков рассеяния фазы обмотки статора и фазы обмотки ротора, приведенное к обмотке статора.

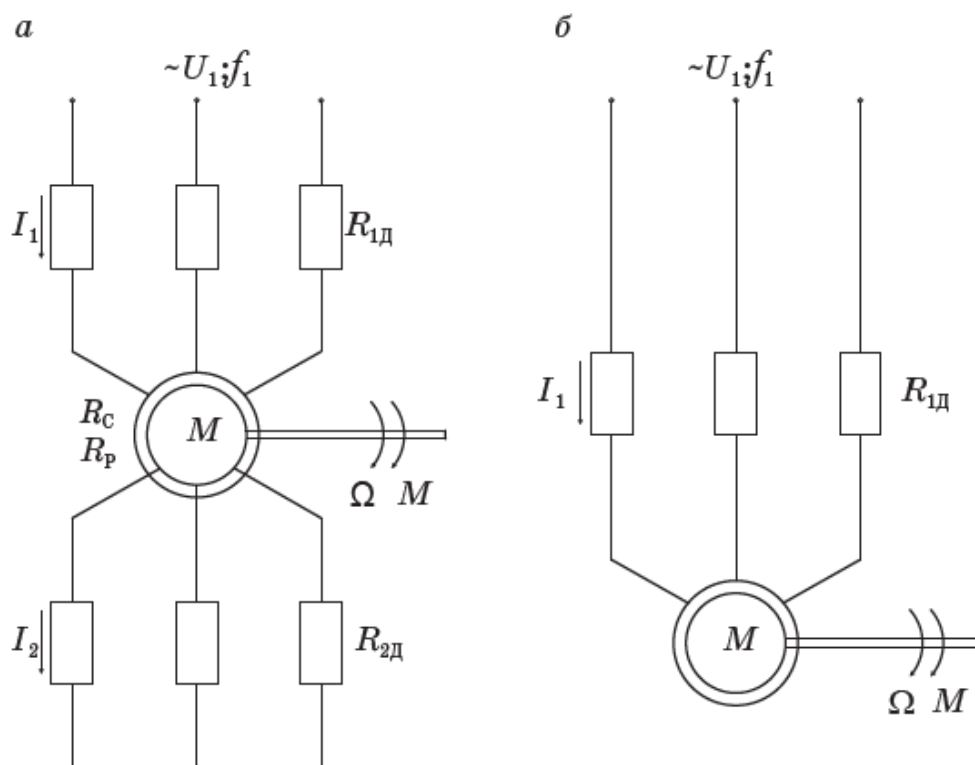


Рисунок 1 – Схема включения АД с фазным ротором (а) и короткозамкнутым ротором (б)

Исходные данные для построения естественных характеристик берутся из каталога асинхронных двигателей, в которых обычно задаются:

Исходные данные для построения естественных характеристик берутся из каталога асинхронных двигателей, в которых обычно задаются:

- $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт;
- $U_{\text{П}}$ – линейное или фазное напряжение питания, В;
- $I_{\text{П}}$ – линейный или фазный ток, А;
- $\frac{M_{\text{П}}}{M_{\text{НОМ}}}$ – кратность пускового момента, о.е.;
- $\cos \varphi$ – коэффициент мощности двигателя, о.е.;
- $\frac{I_{\text{П}}}{I_{\text{НОМ}}}$ – кратность пускового тока, о.е.;
- $\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$ – кратность максимального (критического) момента;
- s – номинальное скольжение, % ;
- n – скорость вращения, об/мин.

Пример. Для привода промышленной установки используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4А90L4УЗ. Используя его технические характеристики построить естественную механическую характеристику в виде зависимости $n_2 = f(M)$. Варианты заданий и характеристики двигателей даны в Приложении.

Паспортные данные двигателя:

- Синхронная частота вращения $n_1 = 1500$ об/мин;
- Номинальная мощность $P_{ном} = 2,2$ кВт;
- Скольжение $s = 5\%$;
- КПД – 80%;
- Коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,83$;
- Кратность максимального (критического) момента $\frac{M_{max}}{M_{ном}} = \frac{M_{кр}}{M_{ном}} = \lambda_m = 2,2$;

Решение.

Анализ механической характеристики показывает, что для асинхронного электродвигателя характерны следующие режимы работы:

1. $s < 0$ - генераторный режим.

Частота вращения двигателя в генераторном режиме больше синхронной частоты, а направление его вращения совпадает с направлением вращения магнитного поля. Генераторный режим является тормозным режимом работы асинхронного двигателя

2. $0 < s < 1$ - двигательный режим.

В двигательном режиме частота вращения двигателя меньше синхронной, а направление его вращения совпадает с направлением вращения магнитного поля.

3. $s > 1$ - режим противовключения.

При работе электродвигателя в режиме противовключения направление его вращения противоположно направлению вращения магнитного поля. Режим противовключения также является тормозным.

Уточненное уравнение механической характеристики, которое может быть получено из формулы электромагнитного момента имеет вид:

$$M = \frac{M_{кр}(2 + as_{к})}{\frac{s}{s_{к}} + \frac{s_{к}}{s} + as_{к}},$$

где $s_{к}$ – критическое скольжение асинхронного двигателя;

a –

Механическая или электромеханическая характеристики называются естественными, если они получены при номинальном напряжении на зажимах статора и при отсутствии в цепях ротора и статора каких-либо дополнительных

сопротивлений (активных или реактивных). При наличии дополнительных сопротивлений или изменении приложенного напряжения на зажимах статора характеристики называются искусственными.

Упрощенная механическая характеристика АД может быть построена на основании паспортных данных электродвигателя: номинального момента M_n , номинального скольжения s и кратности максимального (критического) момента λ_m . При этом критический момент и критическое скольжение могут быть вычислены по формулам:

Определим номинальную частоту вращения ротора и номинальный момент двигателя при номинальной нагрузке

$$n_0 = n_1(1 - s), \quad (1)$$

$$n_0 = 1500(1 - 0,05) = 1425 \text{ об/мин.}$$

$$M_n = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_0} = 9,55 \frac{2200}{1425} = 14,74 \text{ Нм.}$$

Откуда берется множитель 9,55? Если вспомнить, то

$$P_{\text{НОМ}} = M_n \cdot \Omega_n.$$

Следовательно,

$$M_n = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\Omega_n} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\frac{\pi n_n}{30}}.$$

Получаем сложную дробь, которая может быть преобразована к виду:

$$M_n = \frac{30 \cdot P_{\text{НОМ}}}{\pi n_n}.$$

Отношение $30/\pi$ является константой и равно оно 9,55.

ОБРАТИТЬ ВНИМАНИЕ! (Для справки)

Иногда в справочных данных указывается только номинальная частота вращения ротора и не указывается величина скольжения и синхронная скорость вращения. В этом случае, нужно поступать следующим образом:

- По заданной номинальной частоте вращения определить ближайшую синхронную скорость вращения ротора согласно таблице:

Синхронная частота вращения асинхронного двигателя при частоте сети $f=50$ Гц									
250	300	375	500	600	700	1000	1500	3000	-

Например, если бы была задана номинальная частота вращения $n_0 = 1425$ об/мин, то, согласно таблице, ближайшая к этому числу синхронная скорость вращения $n_1 = 1500$ об/мин.

- если не задана номинальная величина скольжения, то ее можно найти по формуле:

$$s_H = \frac{n_1 - n_0}{n_1}.$$

Например, для данных, определенных выше, получаем

$$s_H = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0,05 = 5\%.$$

Такая же величина номинального скольжения задана в исходных данных.

Определим значение критического скольжения, воспользовавшись значением кратности критического скольжения:

$$s_K = s \left(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right) = 0,21$$

$$M_{кр} = \lambda_m M_H = 2,2 \cdot 14,74 = 32,43 \text{ Нм.}$$

Таким образом, определены основные точки характеристики. Для построения механической характеристики воспользуемся формулой Клосса:

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \quad (2)$$

Результаты расчетов момента и частоты вращения представлены в табл. 1.

Таблица 1

s	0	$s = 0,05$	$s_k/2 = 0,105$	$s_k = 0,21$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
M	0	14,61	25,94	32,43	32,39	30,47	26,69	23,16	20,22	17,85
n	1500	1425	1342,5	1185	1200	1050	900	750	600	450
s	0,8	0,9	1,0							
M	15,93	14,35	13,05							
n	300	150	1							

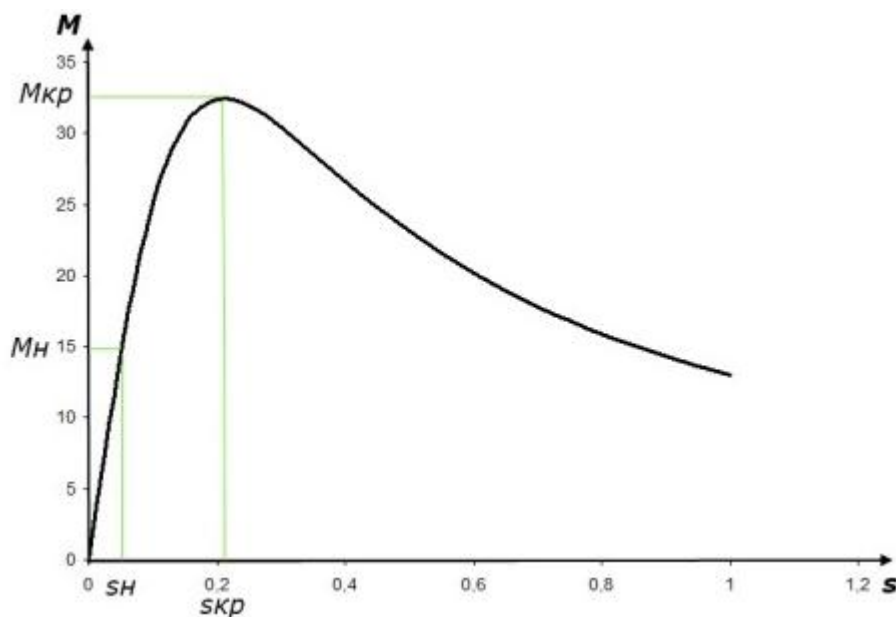
Например, для значения скольжения $s=0,2$ получаем

$$M = \frac{2 \cdot 32,43}{0,2/0,21 + 0,21/0,2} = 32,39 \text{ Нм};$$

$$n = 1500(1 - 0,2) = 1200 \text{ об/мин.}$$

На интервале значений скольжения от 0 до s_k нужно обязательно взять точку, соответствующую номинальному значению, и, в идеале, взять еще 2 точки в интервале от s до s_k . В рассмотренном примере взята 1 точка, соответствующая $s_k/2$.

Теперь на основании расчетов можно построить механическую характеристику. Зависимость момента от скольжения $M = f(s)$ представлена на рис. 2.

Рисунок 2 – Зависимость момента от скольжения $M = f(s)$

Зависимость частоты вращения от момента $n = f(M)$ представлена на рис.3.

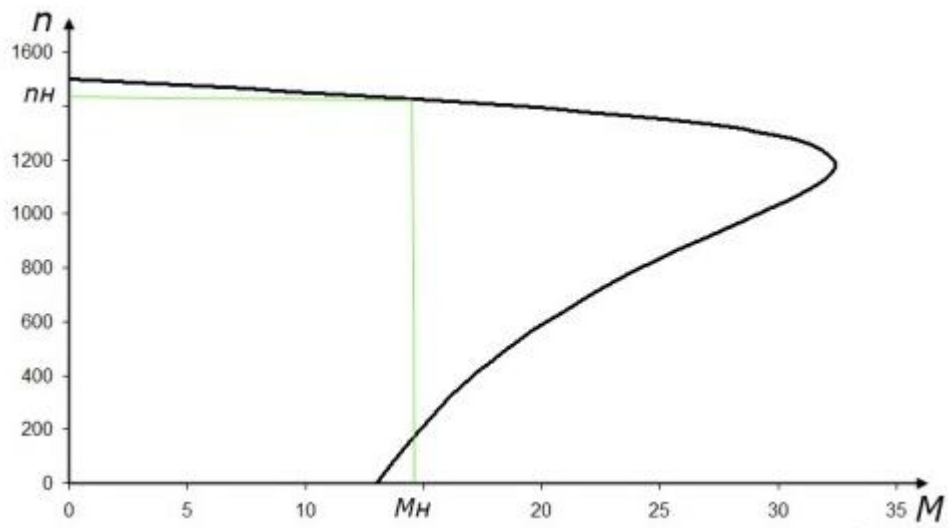


Рисунок 3 – Зависимость частоты вращения от момента $n = f(M)$

Зависимость скольжения от момента $s = f(M)$ (механическая характеристика) представлена на рис. 4.

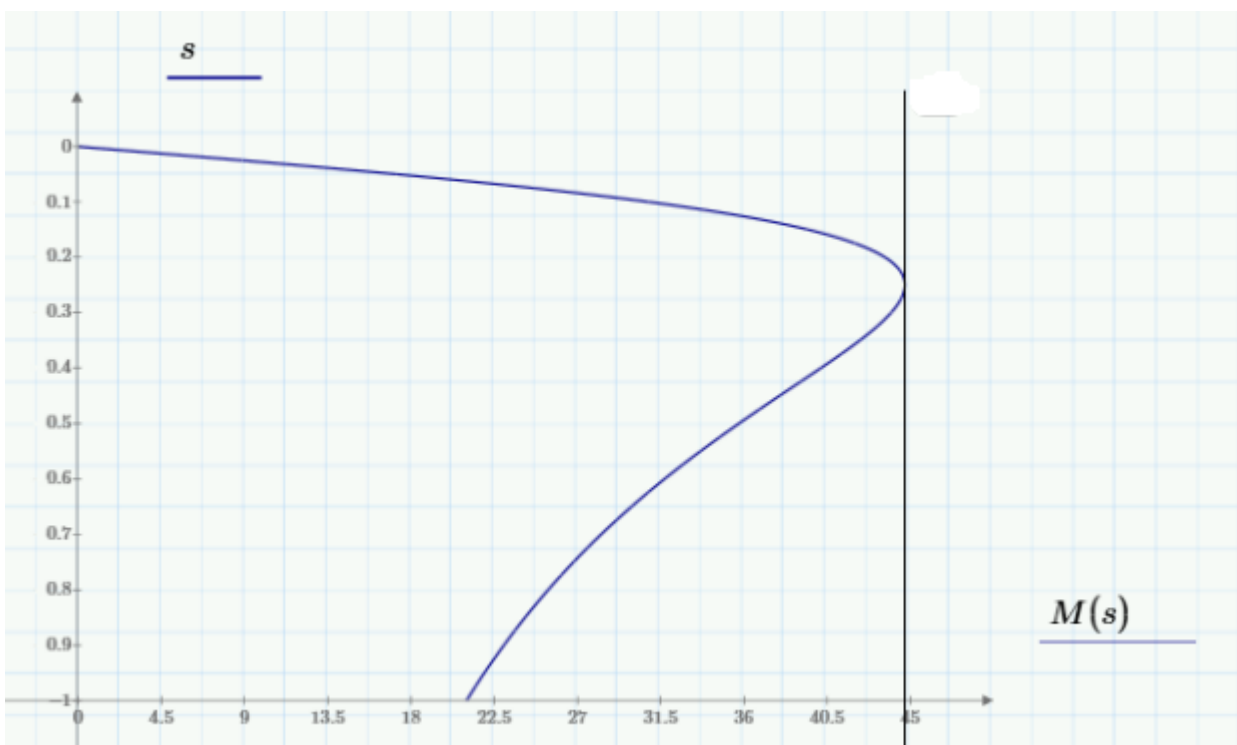


Рис. 4 Механическая характеристика АД

Обращаю внимание, что по оси ОУ (скольжение) центр координат соответствует «1», а точке «1» соответствует НУЛЕВОЕ значение скольжения!!!

Будьте внимательны при построении!

Для практической реализации данного «парадокса» необходимо (в маткаде) организовать цикл по скольжению от 0 до -1 с шагом -0,01. В формуле Клосса в числителе также поставить знак «минус».

Приложение

Таблица 1 – Справочные данные асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором АИР

№ варианта	Тип двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, s, %	КПД, %	$\cos \varphi$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{min}}{M_{ном}}$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$
Синхронная частота вращения 3000 об/мин									
1	АИР71А2	0,75	6	78,5	0,83	2,1	2,2	1,6	6
2	АИР71В2	1,1	6,5	79	0,83	2,1	2,2	1,6	6
3	АИР80А2	1,5	5	81	0,85	2,1	2,2	1,6	7
4	АИР80В2	2,2	5	83	0,87	2	2,2	1,6	7
5	АНР90L2	3	5	84,5	0,88	2	2,2	1,6	7
6	АНР100S2	4	5	87	0,88	2	2,2	1,6	7,5
7	АНР100L2	5,5	5	88	0,89	2	2,2	1,6	7,5
8	АИР112М2	7,5	3,5	87,5	0,88	2	2,2	1,6	7,5
9	АИР132М2	11	3	88	0,9	1,6	2,2	1,2	7,5
10	АНР160S2	15	3	89	0,89	1,8	2,7	1,7	7
11	АИР160М2	18,5	3	89,5	0,9	1,8	2,7	1,7	7
12	АНР180S2	22	2,7	89,5	0,88	1,7	2,7	1,6	7
13	АИР180М2	30	2,5	90,5	0,88	1,7	2,7	1,6	7,5
Синхронная частота вращения 1500 об/мин									
14	АИР71А4	0,55	9,5	70,5	0,7	2,3	2,2	1,8	5
15	АИР71В4	0,75	10	73	0,73	2,2	2,2	1,6	5
16	АИР80А4	1,1	7	75	0,81	2,2	2,2	1,6	5,5
17	АИР80В4	1,5	7	78	0,83	2,2	2,2	1,6	5,5
18	АНР90L4	2,2	7	81	0,83	2,1	2,2	1,6	6,5

Продолжение табл. 1

19	АНР100S4	3	6	82	0,83	2	2,2	1,6	7
20	АНР100L4	4	6	85	0,84	2	2,1	1,6	7
21	АИР112М4	5,5	4,5	87,5	0,88	2	2,2	1,6	7
22	АНР132S4	7,5	4	87,5	0,86	2	2,2	1,6	7,5
23	АИР132М4	11	3,5	87,5	0,87	2	2,2	1,6	7,5
24	АИР16084	15	3	89,5	0,89	1,9	2,9	1,8	7
25	АИР180S4	22	2,5	90	0,87	1,5	2,4	1,3	6,5
26	АИР180М4	30	2	91,5	0,86	1,7	2,7	1,6	7
	Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
27	АИР71А6	0,37	8,5	65	0,66	2	2,2	1,6	4,5
28	АИР71В6	0,55	8,5	68,5	0,7	2	2,2	1,6	4,5
29	АИР80А6	0,75	8	70	0,72	2	2,2	1,6	4,5
30	АИР80В6	1,1	8	74	0,74	2	2,2	1,6	4,5
31	АИР90L6	1,5	7,5	76	0,72	2	2,2	1,6	6
32	АИР100L6	2,2	5,5	81	0,74	2	2,2	1,6	6
33	АИР112МА6	3	5	81	0,76	2	2,2	1,6	6
34	АИР112МВ6	4	5	82	0,81	2	2,2	1,6	6
35	АИР13256	5,5	4	85	0,8	2	2,2	1,6	7
36	АИР132М6	7,5	4	85	0,81	2	2,2	1,6	7
37	АИР16086	11	3	87	0,84	1,7	2,5	1,6	6,5
38	АИР160М6	15	3	88	0,85	1,7	2,6	1,6	6,5
39	АИР180М6	18,5	2	88	0,85	1,6	2,4	1,5	6,5
	Синхронная частота вращения 750 об/мин								
40	АИР13258	4	4,5	83	0,7	1,8	2,2	1,4	6
41	АИР132М8	5,5	5	83	0,74	1,8	2,2	1,4	6
42	АИР160S8	7,5	3	87	0,75	1,6	2,4	1,4	5,5
43	АИР160М8	11	3	87,5	0,75	1,6	2,4	1,4	6

44	АИР180М8	15	2,5	89	0,82	1,6	2,2	1,5	5,5
----	----------	----	-----	----	------	-----	-----	-----	-----

Таблица 2 – Справочные данные асинхронных двигателей серии 4А с фазным ротором ($U_n = 380/220 В$)

№ варианта	Тип двигателя	Мощность, кВт	КПД, %	$\cos \varphi$	Скольжение, %	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	Ток ротора I_{2N} , А	Напряжение ротора U_{2N} , В
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
1	4АК160S4У3	11	86,5	0,87	5	3	22	305
2	4АК160М4У3	14	88,5	0,87	4	3,5	29	300
3	4АК180М4У3	18	89	0,88	3,5	4	38	295
4	4АК200М4У3	22	90	0,87	2,5	4	45	340
5	4АК200L4У3	30	90,5	0,87	2,5	4	55	350
6	4АК250SA4У3	37	90	0,87	3,5	3	160	160
7	4АК225SA4У3	45	91	0,88	3	3	170	230
8	4АК250SB4У3	55	90,5	0,9	3	3	170	200
9	4АК250М4У3	71	91,5	0,86	2,5	3	170	250
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
10	4АК160S6У3	7,5	82,5	0,77	5	3,5	18	300
11	4АК160М6У3	10	84,5	0,76	4,5	3,8	20	310
12	4АК180М6У3	13	85,5	0,8	4,5	4	25	325
13	4АК200М6У3	18,5	88	0,81	3,5	3,5	35	360
14	4АК200L6У3	22	88	0,8	3,5	3,5	45	330
15	4АК225М6У3	30	89	0,85	3,5	2,5	150	140
16	4АК225S6У3	37	89	0,84	3,5	2,5	165	150

Продолжение табл. 2

17	4AK250M6Y3	45	90,5	0,87	3	2,5	160	180
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
18	4AK160S8Y3	5,5	80	0,7	6,5	2,5	14	300
19	4AK160M8Y3	7,5	82	0,7	6	3	16	290
20	4AK180M8Y3	11	85,5	0,72	4	3,5	25	270
21	4AK200M8Y3	15	86	0,7	3,5	3	28	360
22	4AK200L8Y3	18,5	86	0,73	3,5	3	40	300
23	4AK225M8Y3	22	87	0,82	4,5	2,2	140	102