

УДК 621.313

## ПОСТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ковалев Ю.З., Ковалев А.Ю., Солодянкин А.С., Ряхина Е.Ю.  
 НОУ ВПО Академический институт прикладной энергетики,  
 Нижневартовск, Россия

**Рассматривается задача построения электромеханической характеристики асинхронных двигателей по полной Т-образной схеме замещения с последовательным контуром намагничивания.**

**Ключевые слова:** асинхронные двигатели, схемы замещения, каталожные данные, механическая характеристика, электромеханическая характеристика.

«Радикальный способ энергосбережения в электроприводе - переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому»: переход к широкому внедрению электромашинно-преобразовательных управляемых электромеханических систем. Именно эти системы потенциально способны экономить десятки процентов электроэнергии от ее общих затрат на реализацию технологических процессов. Естественно, применительно к асинхронному управляемому электроприводе необходимость производить оценку экономической эффективности при разработке мероприятий приводит к необходимости более точного и обоснованного определения основных характеристик асинхронных двигателей, в частности: уточнения механических и электромеханических характеристик АД.

В данной статье рассматривается построение электромеханической характери-

стики АД - зависимости потребляемого фазой двигателя тока  $I_1$  от скольжения  $S$  (или скорости вращения ротора -  $n$ ) при неизменных фазных напряжениях  $U_2$  и частоте  $f_2$ ,  $w_1 = 2pf_1$ . Уточнение достигается за счет построения характеристики не по Г-образной схеме замещения или Т-образной с различными упрощающими предположениями, а по полной Т-образной схеме замещения с последовательным контуром намагничивания и параметрами:  $r_0, r_1, r_2$  - активными сопротивлениями;  $x_0, x_1, x_2$  - индуктивными сопротивлениями (сопротивления  $r_2, x_2$  приведены к обмотке статора двигателя).

Введем следующие обозначения сопротивлений схемы замещения АД (параметры ротора приведены к обмотке статора):

$$Z_1 = r_1 + jx_1, Z_0 = r_0 + jx_0, Z_2 = \frac{r_2}{S} + jx_2. \quad (1)$$

Ранее нами было показано, что момент на валу двигателя определяется выражением [1]:

$$\frac{M}{M_n} = \frac{k_m S_k S (2 + I)}{S^2 + I S_k S + S_k^2}. \quad (2)$$

Здесь  $M_n$  - номинальный момент,  $k_m$  - кратность максимального момента,  $S_k$  - критическое скольжение,  $I$  - параметр. Критическое скольжение  $S_k$  и параметр  $I$  определяются выражениями

$$S_k = \frac{S_n k_m (1 - k_p) + (1 - S_n) \sqrt{S_n k_p (k_m - 1)(k_m - k_p)}}{(k_m - k_p) - S_n k_p (k_m - 1)}, \quad (3)$$

$$I = \frac{(1 + S_k^2)k_p - 2S_k k_m}{S_k (k_m - k_p)}. \quad (4)$$

Учитывая взаимосвязь между моментом (2) и током в обмотке ротора  $I_2$ , приведенным к обмотке статора

$$M = kI_2^2 \frac{r_2}{S}, \quad k = \frac{m_1 p}{w_1 k_p} \quad (5)$$

получаем:

$$I_2^2 = \frac{M_k S_k S^2 (2 + I)}{kr_2 (S^2 + IS_k S + S_k^2)}. \quad (6)$$

Ток  $\hat{I}_1$ , потребляемый двигателем, может быть выражен через ток  $\hat{I}_2$  и параллельно соединенные сопротивления  $Z_0$  и  $Z_2$  следующим образом:

$$\hat{I}_1 = \frac{Z_0 + Z_2}{Z_0} \hat{I}_2. \quad (7)$$

Поэтому на основании правила  $I_1^2 = \hat{I}_1 \hat{I}_1^*$ , ( $\hat{I}_1^*$  - комплексно-сопряженное значение тока  $\hat{I}_1$ ) через выражение (5) находим:

$$I_1^2 = \frac{\left(r_0 + \frac{r_2}{S}\right)^2 + (x_0 + x_2)^2}{r_0^2 + x_0^2} \frac{M_k (2 + I) S_k S^2}{kr_2 (S^2 + IS_k S + S_k^2)} \quad (8)$$

или после преобразований:

$$I_1^2(S) = D \frac{dS^2 + eS + f}{S^2 + IS_k S + S_k^2}, \quad (9)$$

где

$$d = \frac{r_0^2 + (x_0 + x_2)^2}{r_2 Z_0^2}, \quad e = \frac{2r_0}{Z_0^2}, \quad f = \frac{r_2}{Z_0^2}, \quad D = \frac{M_k (2 + I) S_k}{k}. \quad (10)$$

Три любых известных значений тока  $I_1$ , при известных трех значениях скольжения  $S$  приводят к трем уравнениям относительно параметров  $d, e, f$  (10). Если же известны параметры схемы замещения, то тогда определение параметров (10) осуществляется непосредственно по формулам (10).

Как правило каталожные данные содержат данные, позволяющие найти значения номинального  $I_1 = I_{1n}$ ,  $S = S_n$  и пуско-

вого  $I_p = k_l I_n$ ,  $S=I$  токов. В качестве третьего значения тока  $I_1$ , целесообразно выбрать ток холостого хода  $I_1 = I_{1x}$ ,  $S=0$ , поскольку он также либо может быть определен по каталожным данным, либо имеет достаточно приемлемые оценки. В результате из (9) получим три уравнения относительно коэффициентов  $d, e, f$ .

$$f + eS_n + dS_n^2 = \frac{I_{1n}^2 (S_n^2 + IS_k S_n + S_k^2)}{D} = \frac{F_n}{D}, \quad (11)$$

$$f + e + d = \frac{I_{1p}^2 (1 + IS_k + S_k^2)}{D} = \frac{F_p}{D}, \quad (12)$$

$$f = \frac{I_{1x}^2 S_k^2}{D} = \frac{F_0}{D}. \quad (13)$$

Система уравнений (11) - (13) имеет единственное решение

$$f = \frac{F_0}{D}, \quad (14)$$

$$e = \frac{1}{D} \left( \frac{F_n}{(1-S_n)S_n} - \frac{F_p S_n}{1-S_n} - \frac{F_0(1+S_n)}{S_n} \right) = \frac{e_1}{D}, \quad (15)$$

$$d = \frac{1}{D} \left( \frac{F_p}{1-S_n} + \frac{F_0}{S_n} - \frac{F_n}{(1-S_n)S_n} \right) = \frac{d_1}{D}. \quad (16)$$

Таким образом, все коэффициенты и параметры уравнения (9) могут быть вычислены либо на основании известных параметров схемы замещения (1) в тех случаях, когда они определены расчетным или экспериментальным путем; либо на основании каталожных данных, непосред-

венно содержащихся в каталогах или полученных из них простым перерасчетом:  $M_n, M_p, I_{1n}, I_{1p}, I_{1x}, S_n, U_1, m_1, p, f_1$ .

Окончательно электромеханическая характеристика АД получается из выражений (9), (14) – (16) в следующем виде:

$$I(S) = \sqrt{\frac{d_1 S^2 + e_1 S + F_0}{S^2 + I S_k S + S_k^2}}. \quad (15)$$

Типичный вид электромеханической характеристики для электрических двигателей различной мощности и габаритов приведен на рис. 1.

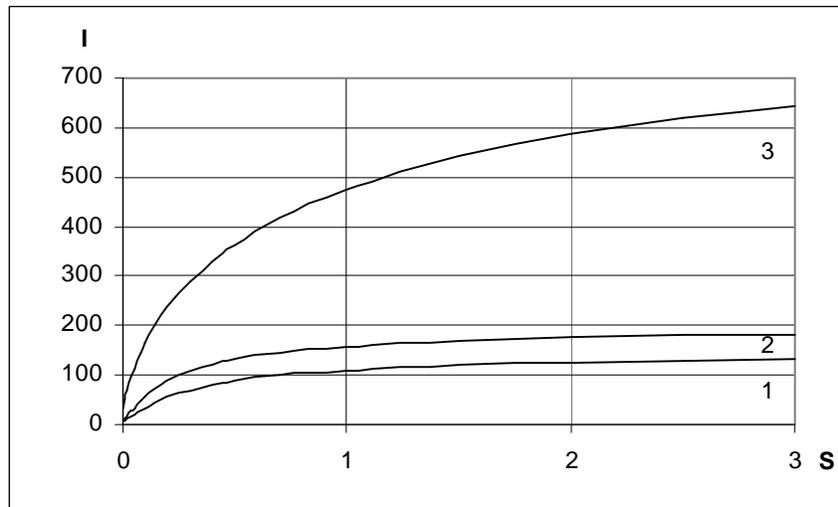


Рис. 1. Электромеханические характеристики АД. 1 – ВА112М2; 2 – ВА132М2; 3 – ВА200М2

Механическая и электромеханическая характеристики асинхронного двигателя (2), (15) определяют основные свойства двигателя как потребителя электрической энергии из сети и источника механической энергии для привода рабочих машин.

Выполненные расчеты представлены в табл.1.

В [1] было показано что, условием физической реализуемости выражения для механической характеристики является выполнение неравенства  $I < 2$ . Нетрудно заметить что, это же условие необходимо и для физической реализуемости выражения для тока  $I_1$ .

Таблица 1. Технические характеристики двигателей взрывозащищенного исполнения

Расчетные данные

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Нм	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Номинальное скольжение S <sub>н</sub>	Критическое скольжение S <sub>кр</sub>	Параметр λ	F <sub>п</sub>	F <sub>р</sub>	I <sub>х</sub>	d <sub>1</sub>	e <sub>1</sub>	F <sub>о</sub>
ВА80МА2	1,5	2850	81,5	0,85	3,3	5	2,4	2,6	6,5	0,050	0,520	3,31	3,9	1377	1,49	1379	-2,7	0,6
ВА80МВ2	2,2	2850	82	0,86	4,7	7,4	2,5	2,6	6,5	0,050	0,606	4,38	11,1	3757	2,12	3754	-1,7	1,6
ВА112М2	7,5	2900	88	0,88	14,7	24,7	2,5	3,3	7,5	0,033	0,351	1,75	31,3	21119	6,62	21038	75,6	5,4
ВА132М2	11	2910	88	0,9	21,2	36,1	1,8	2,8	7,5	0,030	0,261	1,78	37,1	38597	9,53	38723	-131,9	6,2
ВА160С2	15	2930	90	0,88	28,8	48,5	2,2	2,9	7	0,023	0,289	3,50	89,2	85165	12,96	83885	1266,0	14,0
ВА160М2	18,5	2930	90	0,89	35,1	60,3	2,4	3	7	0,023	0,318	3,85	160,5	140397	15,80	137791	2580,3	25,2
ВА180С2	22	2910	88	0,89	42,7	72,2	2	2,7	7	0,030	0,298	2,73	208,0	169831	19,22	169030	768,2	32,8
ВА180М2	30	2925	90,5	0,85	59,5	97,9	2,2	3	7,5	0,025	0,289	2,82	369,4	377783	26,78	374706	3017,1	59,8
ВА200М2	37	2940	93	0,89	68	120	2,4	2,8	7	0,020	0,331	6,12	695,5	709957	30,60	694091	15763,8	102,6
ВА200Л2	45	2940	93	0,89	82,6	146	2,4	2,8	7	0,020	0,331	6,12	1026,2	1047550	37,17	1024139	23259,7	151,3
ВА225М2	55	2955	93	0,9	101	178	2,1	2,7	6,9	0,015	0,242	6,33	831,7	1257119	45,43	1227999	28999,7	120,4
ВА250С2	75	2960	93,6	0,92	132	242	2	3	7,5	0,013	0,198	4,48	895,6	1889116	61,98	1857915	31050,4	151,3
ВА250М2	90	2955	93,5	0,93	157	291	1,8	2,7	7	0,015	0,196	4,57	1289,1	2339523	74,34	2302121	37189,2	213,3
ВА280С2	110	2965	93,5	0,92	194	354	1,6	2,3	6,5	0,012	0,167	7,51	1602,5	3627091	90,86	3550615	76245,9	229,7
ВА280М2	132	2965	94,5	0,92	231	425	1,8	2,5	7,2	0,012	0,185	7,26	2660,7	6568073	108,52	6449265	118406,4	401,5
2р=4, n = 1500 об/мин																		
ВА80МА4	1,1	1420	74	0,8	2,8	7,4	2,1	2,4	5	0,053	0,451	2,69	2,1	473	1,8	471	2,1	0,7
ВА80МВ4	1,5	1410	75	0,81	3,8	10,1	2,1	2,4	5	0,060	0,468	2,23	4,1	817	2,5	819	-2,7	1,3
ВА112М4	5,5	1440	86	0,83	11,7	36,5	2,5	3	7	0,040	0,412	2,20	28,4	13918	7,0	13967	-57,6	8,4
ВА132С4	7,5	1440	87,5	0,86	15,1	49,7	2,1	2,6	7	0,040	0,368	2,56	39,8	2321	9,1	23430	-219,6	11,1
ВА132М4	11	1445	88,5	0,85	22,2	72,7	2,3	3,2	7,5	0,037	0,337	1,52	64,9	43265	12,2	43539	-290,4	17,0
ВА160С4	15	1450	89	0,85	30,1	98,7	2,2	2,6	6,5	0,033	0,373	3,80	169,8	97832	16,6	97079	714,6	38,1
ВА160М4	18,5	1450	89,5	0,86	36,5	122	2,2	2,6	6,5	0,033	0,373	3,80	249,7	143858	20,1	142751	1050,8	56,1
ВА180С4	22	1460	90	0,84	44,2	144	1,7	2,7	7	0,027	0,238	2,14	138,8	150014	24,3	150034	-53,3	33,5
ВА180М4	30	1460	90,5	0,85	59,3	196	1,7	2,7	7	0,027	0,238	2,14	249,8	270020	29,7	269663	307,1	49,9

Каталожные данные

Продолжение таблицы 1.

Каталожные данные										Расчетные данные									
Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Нм	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Номинальное скольжение $s_n$	Критическое скольжение $s_{кр}$	Параметр $\lambda$	$F_n$	$F_p$	$I_x$	$d_l$	$e_l$	$F_o$	
ВА200М4	37	1460	92	0,85	71,9	242	2,5	2,6	6,5	0,027	0,521	9,00	2054,4	1301948	36,0	1271634	29963,4	351,1	
ВА200Л4	45	1460	92	0,85	87,5	294	2,5	2,6	6,8	0,027	0,521	9,00	3042,5	2110294	43,8	2070387	39387,2	519,9	
ВА225М4	55	1475	93	0,86	105	356	2,3	2,5	6,5	0,017	0,360	11,09	2164,6	2385760	42,0	2307828	77703,6	228,5	
ВА250С4	75	1485	94,3	0,85	142	482	2,2	2,3	7,2	0,010	0,355	23,79	4245,2	10003274	56,8	9716157	286710,5	406,5	
ВА250М4	90	1485	95	0,88	164	579	2,2	2,3	7,3	0,010	0,355	23,79	5662,5	13716203	65,6	13336998	378662,4	542,2	
ВА280С4е	110	1485	95,1	0,87	202	707	2	2,1	6,4	0,010	0,326	25,85	7783,1	15939849	80,8	15384105	555049,3	694,2	
ВА280М4е	132	1485	95,8	0,88	238	849	2,2	2,3	7,5	0,010	0,355	23,79	11925,5	30491369	95,2	29708957	781270,2	1141,9	
<b>2р=6, n = 1000 об/мин</b>																			
ВА80М6	0,75	930	71	0,7	2,3	7,7	2	2,2	4,5	0,070	0,515	2,57	1,9	277	2,0	283	-6,9	1,0	
ВА80МВ6	1,1	930	71	0,71	3,3	11,3	2	2,2	4,1	0,070	0,515	2,57	3,9	474	2,3	469	3,4	1,4	
ВА112М6	3	950	81	0,78	7,2	30,1	2,2	2,6	5,5	0,050	0,429	2,18	12,1	3325	5,0	3339	-18,6	4,7	
ВА112МВ6	4	945	82	0,8	9,3	40,4	2,2	2,6	5,5	0,055	0,443	1,86	21,1	5282	6,5	5334	-60,2	8,3	
ВА132С6	5,5	960	85	0,8	12,3	54,7	2	2,4	6,5	0,040	0,372	3,29	28,6	15116	8,0	15222	-114,7	8,9	
ВА132М6	7,5	960	85,5	0,81	16,5	74,6	2,2	2,5	6,5	0,040	0,423	3,78	66,5	31930	10,7	32043	-133,2	20,6	
ВА160С6	11	970	87	0,81	23,7	108	1,8	2,7	6,5	0,030	0,265	2,08	49,2	38482	14,2	38454	13,2	14,2	
ВА160М6	15	970	88	0,84	30,8	148	1,8	2,5	6,5	0,030	0,276	2,88	95,8	74989	18,5	74883	79,8	26,1	
ВА180М6	18,5	975	89,5	0,83	37,8	181	1,8	2,5	6,5	0,025	0,256	3,56	127,1	119335	22,7	118529	772,2	33,7	
ВА200М6	22	975	90	0,84	44,2	215	2,1	2,2	6	0,025	0,456	11,59	666,7	457159	26,5	447390	9621,8	146,5	
ВА200Л6	30	975	90	0,84	60,3	294	2,2	2,6	6	0,025	0,336	5,20	572,6	374793	33,2	365888	8780,8	124,4	
ВА225С6	37	980	91	0,84	73,6	360	2,3	2,4	6,4	0,020	0,456	12,90	1767,8	1574093	40,5	1533084	40667,7	341,2	
ВА250С6	45	985	93	0,84	87,5	436	1,9	2	6,2	0,015	0,358	19,90	1799,7	2427359	48,1	2362287	64774,9	296,5	
ВА250М6	55	985	92,5	0,84	108	533	1,9	2	6,2	0,015	0,358	19,90	2741,7	3697987	48,6	3588897	108787,8	302,4	
ВА280С6е	75	990	94,5	0,85	142	723	1,9	2	6,2	0,010	0,311	27,09	3642,4	7369163	63,9	7115054	253715,6	393,7	
ВА280М6е	90	990	94,5	0,85	170	868	1,9	2,2	6,2	0,010	0,224	15,03	2425,2	4906467	76,5	4740412	165761,6	293,5	
<b>2р=8, n = 750 об/мин</b>																			
ВА112М8	2,2	715	79	0,64	6,3	29,4	2,5	2,8	5	0,047	0,481	2,67	11,6	2495	4,7	2466	23,8	5,2	
ВА112МВ8	3	710	77,5	0,67	8,6	40,3	2,1	2,4	4,5	0,053	0,451	2,69	20,0	3617	6,5	3583	25,7	8,4	

Продолжение таблицы 1.

Расчетные данные

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Нм	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Номинальное скольжение $S_n$	Критическое скольжение $S_{kp}$	Параметр $\lambda$	$F_n$	$F_p$	$I_x$	$d_1$	$e_1$	$F_0$
BA132S8	4	715	83	0,7	10,5	53,4	1,9	2,3	5	0,047	0,380	2,81	21,6	6099	7,9	6103	-12,8	8,9
BA132M8	5,5	715	83	0,74	13,6	73,4	1,9	2,4	5,5	0,047	0,364	2,23	31,9	10873	9,5	10946	-84,8	12,0
BA160S8	7,5	725	86	0,7	18,9	98,7	1,6	2,4	5	0,033	0,260	2,22	31,3	14689	13,2	14576	100,5	11,8
BA160M8	11	725	86	0,73	26,6	145	1,6	2,2	5	0,033	0,271	3,22	73,5	34439	17,3	34007	410,3	22,0
BA180M8	15	730	86	0,78	34	196	1,6	2,2	5,5	0,027	0,247	4,13	102,6	72757	22,1	71911	815,8	29,7
BA200M8	18,5	735	88	0,76	43	240	2	2,6	6,4	0,020	0,261	4,96	174,9	179099	28,0	176496	2548,8	53,3
BA200L8	22	730	88	0,78	49	288	2	2,5	6	0,027	0,305	4,34	309,5	208897	31,9	206230	2572,7	94,2
BA225M8	30	735	91	0,8	62,6	390	2,1	2,2	5,4	0,020	0,427	14,16	1189,4	825761	37,6	794785	30719,1	257,1
BA250S8	37	740	92	0,73	83,7	478	1,8	2,6	6,5	0,013	0,191	5,73	357,9	630131	50,2	618313	11726,2	91,7
BA250M8	45	740	93	0,75	98	581	1,8	2,6	6,8	0,013	0,191	5,73	490,7	945417	58,8	930318	14972,9	125,7

Каталожные данные

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ковалев Ю.З. Условие физической реализуемости математических моделей асинхронных двигателей// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2009 - № 4.
2. Ковалев А.Ю. Построение электро-технической характеристики асинхронного двигателя //Россия молодая: первые технологии – в промышленность. Материалы II Всероссийской молодежной научно-технической конференции 21 – 22 апреля. – 2009. - стр. 49.
3. Владимирский электромоторный завод. Технический каталог. РУСЭЛПРОМ. – Ч.2. – [www.vemp.ru](http://www.vemp.ru).

**THE BUILDING OF ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTIC OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR**

Kovalev Yu.Z., Kovalev A.Yu., Solodyankin A.S., Ryakhina E.Yu.

*Academic institute of applied energy, Nizhnevartovsk, Russia*

This article dwells on the building of the electromechanical characteristic of asynchronous motor, founded on the applied T – replacement scheme with the consecutive magnetizing contour.

Key words: asynchronous motors, replacement scheme, catalogue data, mechanical characteristic, electromechanical characteristic.