

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
АСИНХРОННЫХ РОЛЬГАНГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. В. ДНЕПРОВСКИЙ, О. П. МУРАВЛЕВ, С. А. ШЕЛЕХОВ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин  
и общей электротехники)

Серия трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, выпускаемая по ГОСТ 10283—62<sup>1)</sup> предназначена для работы в длительном и повторно-кратковременном режимах. В настоящее время двигатели серии АР считаются одними из наиболее надежных электрических двигателей, применяемых на металлургических заводах. Они способны выдерживать режим короткого замыкания при номинальном напряжении порядка 10 мин., в то время как другие асинхронные двигатели выходят из строя в этом режиме обычно через 10—30 сек.

Качество двигателей серий АР характеризуется соблюдением точности параметров, регламентированных стандартом. Под точностью в данном случае будем подразумевать соответствие действительных и регламентированных параметров.

Двигатели серии АР выпускаются 10 лет. Быстрое развитие науки и техники привело к необходимости обновления серии АР. Для создания новой серии рольганговых двигателей, удовлетворяющей мировым стандартам, требуется научно обоснованная технологическая и конструкторская проработка. Поэтому анализ фактического рассеивания параметров двигателей при существующей технологии их изготовления является необходимым для обоснованного назначения допусков и номинальных значений параметров. В связи с этим в работе приводятся результаты статистического анализа параметров, полученных при контрольных и типовых испытаниях двигателей серии АР 4—7 габаритов.

В результате проведения типовых и контрольных испытаний в СКБЭМ и на заводе «Сибэлектромотор» накоплен обширный статистический материал, достаточно полно представляющий серию АР. Это позволяет для исследования разброса параметров использовать вероятностные методы анализа.

Качество электродвигателей серии АР характеризуется точностью соблюдения следующих характеристик: пускового момента  $M_n$ , пускового  $I_k$  и номинального  $I_n$  токов, динамической постоянной  $D$ , потерь  $P_k$  короткого замыкания, скорости вращения  $n_n$ , коэффициента полезного действия  $\eta$  и коэффициента мощности  $\cos\phi$ , которые мы в дальнейшем будем называть выходными параметрами. Выходные параметры электрических машин имеют разброс, вызванный целым рядом причин

1) С 1 января 1970 г. этот ГОСТ заменен редакцией 1969 г. (ГОСТ 10283-69).

(технологические отклонения, качество исходных материалов, изменение температуры, погрешности измерения и т. д.), и поэтому могут рассматриваться как случайные величины, имеющие свой закон распределения. Для исследований необходимо знать этот закон распределения параметров.

В работах [1—3] показано, что выходные параметры асинхронных двигателей и параметры контрольных испытаний являются случайными величинами с нормальным законом распределения. О нормальности кривой распределения можно судить по величине статистик, характеризующих косость и крутость, которые подсчитываются на основании экспериментальных данных. Критерием нормальности распределения являются равенства [4]:

$$\alpha = \iota = 0,$$

где  $\alpha$  — эмпирическая мера косости,  $\iota$  — эмпирическая мера крутости распределения.

Если эмпирические меры косости и крутости таковы, что интервалы  $\alpha \pm 3\sigma_\alpha$  и  $\iota \pm 3\sigma_\iota$  содержат нулевую точку, то распределение параметров можно считать нормальным. Здесь  $\sigma_\alpha$  и  $\sigma_\iota$  — основные ошибки  $\alpha$  и  $\iota$ , определяемые формулами:

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{6}{n}}, \quad (2)$$

$$\sigma_\iota = 2\sigma_\alpha, \quad (3)$$

где  $n$  — объем выборки.

Величины статистики  $\alpha$  и  $\iota$  и их основные ошибки, характеризующие закон распределения, подсчитываем по результатам контрольных испытаний двигателей.

В табл. 1 приведены значения статистик для ряда параметров двигателей АР 53-12 и АР 74-12. Анализ табл. 1 показывает, что для боль-

Таблица 1

Тип двигателя	Параметр	$n$	$\alpha$	$(\alpha - 3\sigma_\alpha) - (\alpha + 3\sigma_\alpha)$	$\iota$	$(\iota - 3\sigma_\iota) - (\iota + 3\sigma_\iota)$
АР 53-12	$I_0$	201	0,0614	-0,455—+0,577	-0,2676	-1,300—+0,764
	$P_0$	205	-0,3718	-0,885—+0,141	-0,4846	-1,511—+0,541
	$I_K$	205	0,3717	-0,141—+0,885	0,1846	-0,841—+1,211
	$P_K$	205	0,2064	-0,307—+0,719	-0,3635	-1,394—+0,658
	$M_\Pi$	205	-0,0756	-0,589—+0,437	0,7668	-0,259—+1,793
АР 74-12	$I_0$	200	-0,1928	-0,712—+0,326	0,0298	-1,008—+1,068
	$P_0$	200	0,7594	+0,240—+1,278	0,0452	-0,993—+1,083
	$I_K$	200	-0,4774	-0,996—+0,042	1,0229	-0,015—+2,061
	$P_K$	200	-0,0657	-0,585—+0,453	0,7222	-0,316—+1,760
	$M_\Pi$	200	-0,4281	-0,947—+0,091	-1,1908	-2,229—-0,153

шинства параметров условие нормальности (1) выполняется, за исключением  $P_0$  и  $M_\Pi$ , для АР 74-12, распределение которых можно считать приближенно нормальным.

На основании табл. 1 и ранее проведенных исследований по асинхронным двигателям серий А и АО, АО2 и ВАО можно считать, что и все остальные выходные параметры рольганговых двигателей имеют нормальный закон распределения.

Для достаточно надежной оценки нормально распределенных случайных величин (выходных параметров электродвигателей) по опытными данным вычисляем среднее значение выходного параметра  $\bar{X}$  и исправленную статистическую дисперсию  $\bar{S}^2$ .

$$\bar{S}^2 = \frac{n}{n-1} \sigma^2, \quad (4)$$

где  $\bar{\sigma}$  — среднее квадратическое отклонение.

Исправленная статистическая дисперсия  $\bar{S}^2$  является состоятельной и несмещенной оценкой дисперсии общей совокупности [4].

В табл. 2, 3 представлены средние значения выходных параметров и сравнение их с регламентированными (и нерегламентированными) значениями параметров по ГОСТ 10283—62.

В этой же таблице приведены новые значения параметров, принятые в ГОСТ 10283—69.

Данные табл. 2, 3 показывают, что соотношение фактических средних значений выходных параметров и заданных номинальных по ГОСТ различно для различных параметров и типоразмеров двигателей. Так, например, по  $I_k$  все типоразмеры двигателей имеют среднее значение ниже регламентированного и для ряда двигателей (АР53-8, 10; АР73-10, 12; АР74-10, 16) это расхождение значительное.

Фактические средние значения  $I_k$ , полученные в результате статистической обработки, показывают, что для ряда типов двигателей номинальные значения  $I_k$  можно уменьшить. Заложенный для производства большой запас по  $I_k$  является неоправданным.

Выходной параметр  $P_k$  имеет среднее значение для всех типов двигателей, приблизительно соответствующее каталожному.

Фактические значения  $M_n$  для всех типоразмеров двигателей выше регламентированных и для ряда двигателей (АР42-4; АР 43-4,6 и АР74-10,16) они превышают каталожные на 30—50%. Причем в большинстве случаев довольно четко прослеживается закономерность роста пусковых моментов в одном и том же габарите с увеличением числа полюсов. Это объясняется тем, что серия АР была спроектирована с максимальной унификацией деталей и узлов. Требования, оговоренные в техническом задании, ограничивали нижнюю границу значений  $M_n$  при низких частотах, что привело к тому, что фактические значения при 50 гц получились завышенными по сравнению с номинальными значениями.

Из результатов сравнения и анализа данных табл. 2 по пусковым моментам видно, что при максимальной унификации деталей и узлов твердая шкала пусковых моментов для всех скоростей вращения при 50 гц в одном и том же габарите является неоправданной.

Сравнение средних значений динамической постоянной  $D$  при ПВ 25% со значениями по ГОСТ 10283—62 и ГОСТ 10283—69 производилось для превышения температуры обмотки статора 120°C. Пересчет проводился по формуле (ГОСТ 10283—69)

$$D_{120^\circ} = \frac{120}{\tau} D_\tau, \quad (5)$$

где  $D_\tau$  — динамическая постоянная для температуры  $\tau$ , отличной от 120 на  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Значения  $D_{120^\circ}$ , приведенные в ГОСТ 10283—69, согласуются с данными, полученными при статистической обработке, хотя для двигателей АР52-12, АР73-10 имеется возможность повышения номинальных значений  $D_{120^\circ}$ .

Средние значения  $I_n$ ,  $n_n$ ,  $\eta$  и  $\cos\varphi$  имеют отклонения в обе стороны. Поскольку отклонения невелики, то можно считать, что эти параметры соответствуют установленным номинальным значениям.

Для оценки точности обеспечения параметров при существующей технологии были получены значения несмещенной оценки дисперсии  $\bar{S}^2$ .

Тип двигателя АР	n	I <sub>к</sub>			P <sub>к</sub>			M <sub>п</sub>			D <sub>120°</sub>		
		$\bar{X}$	ГОСТ 10283— —62	ГОСТ 10283— —69	$\bar{X}$	ГОСТ 10283— —62	ГОСТ 10283— —69	$\bar{X}$	ГОСТ 10283— —62	ГОСТ 10283— —69	$\bar{X}$	ГОСТ 10283— —62	ГОСТ 10283— —69
42-4	8	8,77	9	9	4,28	4,3	4,5	1,81	1,4	1,4	607	450	530
43-4	6	12,63	15	15	6,22	6,5	6,5	2,79	2,4	2,4	602	500	630
42-6	6	7,21	8,6	8	3,30	3,6	3,6	2,07	1,4	1,4	1067	900	1060
43-6	10	10,26	12	12	4,68	5,0	5,0	3,10	2,4	2,4	1306	1100	1260
43-8	8	7,22	10	10	3,63	4,5	4,5	2,93	2,4	2,4	2189	1720	1980
42-10	12	5,18	6	6	2,56	3,0	3,0	2,19	1,4	1,4	2141	2000	2220
43-10	17	6,88	8	8	3,36	3,6	3,6	3,0	2,4	2,4	2833	2300	2750
43-12	7	5,79	8	7	2,53	3,3	2,8	2,87	2,4	2,4	3354	2920	3500
53-8	6	18,85	23	23	8,71	10	10	8,45	7,0	7,0	4062	3900	4100
52-10	4	11,78	15	13	5,23	6	6	5,60	4,5	4,5	5305	4800	5000
53-10	8	16,74	22	21	7,56	9	9	8,74	7,0	7,0	6532	5570	6000
52-12	6	10,76	13	11	4,40	5	5	5,34	4,5	4,5	7227	6450	6380
53-12	12	17,25	21	20	7,43	8	8	9,50	7,0	7,0	8114	7500	7560
64-10	8	29,42	32	33	14,18	15	15	16,43	14,0	14,0	10200	8550	9370
63-12	5	19,10	22	23	8,87	9	9	11,27	10,0	10,0	11723	10000	10300
64-12	6	30,62	31	31	14,28	13	13	17,32	14,0	14,0	12840	11100	12300
64-16	6	25,06	28	28	9,78	11	11	17,82	14,0	14,0	18665	17700	18600
73-10	13	44,80	55	50	20,67	23	23	25,60	20,0	20,0	12098	11500	11250
74-10	8	62,60	75	70	29,76	32	32	37,30	28,0	28,0	12899	12900	12800
73-12	4	36,10	50	42	15,94	20	20	23,90	20,0	20,0	16735	14100	15300
73-16	12	35,6	40	37	14,82	16	16	25,70	20,0	20,0	25687	23000	24000
74-16	13	51,4	60	58	21,31	25	25	39,3	28,0	28,0	28841	28200	28000

Таблица 3

Тип двигателя АР	<i>n</i>	$\eta$ , %			$\cos \varphi$			$n_H$			$I_H$		
		$\bar{X}$	ГОСТ 10283— —62	ГОСТ 10283— —69	$\bar{X}$	ГОСТ— 10283— —62	ГОСТ— 10283— —69	$\bar{X}$	ГОСТ 10283— —62	ГОСТ 10283— —69	$\bar{X}$	ГОСТ 10283— —62	ГОСТ 10283— —69
42-4	8	76,4	75	75	0,79	0,77	0,77	1362	1350	1290	2,13	2,2	2,9
43-4	6	78,6	77	77	0,81	0,78	0,78	1353	1350	1290	3,11	3,3	3,8
42-6	6	71,6	70	70	0,63	0,60	0,60	890	900	870	2,54	2,7	3,3
43-6	10	71,9	74	74	0,67	0,64	0,64	868	900	870	3,49	3,5	3,8
43-8	8	64,9	66	66	0,65	0,61	0,61	632	660	640	3,06	3,2	3,4
42-10	12	55,2	55	55	0,54	0,50	0,50	511	530	520	2,55	2,8	2,8
43-10	17	56,0	57	57	0,52	0,50	0,50	513	530	520	3,42	3,5	3,5
43-12	7	45,7	42	42	0,40	0,36	0,36	435	450	430	3,35	4,0	4,0
53-8	6	76,8	76	76	0,70	0,67	0,67	660	650	640	5,72	6,0	6,6
52-10	4	71,1	66	66	0,60	0,60	0,60	523	530	520	4,68	5,0	5,0
53-10	8	72,3	68	68	0,58	0,58	0,58	518	520	520	6,57	6,9	6,9
52-12	6	63,6	62	62	0,50	0,50	0,50	432	430	430	4,81	4,9	4,9
53-12	12	64,6	65	65	0,42	0,43	0,43	446	430	430	7,94	7,6	7,6
64-10	8	77,5	74	74	0,66	0,62	0,62	544	530	530	8,4	9,3	9,3
63-12	5	70,5	69	69	0,61	0,54	0,54	432	440	435	7,08	7,7	7,7
64-12	6	71,2	70	70	0,55	0,49	0,49	456	440	435	9,38	10,2	10,2
64-16	6	56,8	55	55	0,36	0,34	0,34	334	325	325	12,52	13,8	13,8
73-10	13	78,6	76	76	0,77	0,75	0,75	528	520	530	12,58	13,3	13,3
74-10	8	79,7	77	77	0,78	0,75	0,75	534	520	530	15,76	16,8	17,0
73-12	4	77,8	75	75	0,61	0,59	0,59	452	465	450	11,28	12,0	14,0
73-16	12	68,0	67	67	0,47	0,45	0,45	330	330	330	14,22	15,1	15,0
74-16	13	71,4	70	70	0,45	0,45	0,45	336	330	330	18,82	19,2	19,3

Как известно, для нормального закона распределения случайные величины с вероятностью 0,9973 укладываются в пределах  $\pm 3\bar{S}$ .

Разброс параметров будем оценивать с помощью половины поля рассеивания

$$\delta_x = \frac{300 \bar{s}}{x}, \quad \% \quad (6)$$

В табл. 4 приведены значения половины поля рассеивания для ряда параметров асинхронных рольганговых двигателей серии АР 4-7 габаритов,

Таблица 4

№ пп	Параметр	$\delta_x, \%$	№ пп	Параметр	$\delta_x, \%$
1	$I_0$	5,6—27,6	7	$\cos \varphi$	2,8—15,5
2	$P_0$	3,2—45,3	8	$D_{120^\circ}$	4,1—50,4
3	$I_k$	8,0—39,9	9	$n_n$	2,6—11,6
4	$P_k$	7,1—54,0	10	$\Delta t_{cu}$	6,4—54,6
5	$M_{II}$	12,2—50,1	11	$I_H$	4,5—18,9
6	$\eta$	1,6—16,1	12	$\Sigma P$	6,8—48,6

где

$\Delta t_{cu}$  — превышения температуры обмотки статора в длительном режиме работы;

$\Sigma P$  — суммарные потери.

Как видно из табл. 4, часть параметров имеет большой разброс, указывающий на то, что они наиболее чувствительны к отклонениям входных параметров.

В табл. 5 приведены средние значения половины поля рассеивания  $|\delta_x|$  и допуск по ГОСТ для ряда параметров асинхронных рольганговых двигателей серии АР 4-7 габ. Для  $\eta$  и  $\cos \varphi$  подсчитан средний допуск.

Таблица 5

Параметр	$D_{120^\circ}$	$I_k$	$\eta$	$\cos \varphi$
$ \delta_x , \%$	21,17	18,90	7,68	8,11
Допуск по ГОСТ, %	-5,0	+15,0	-4,63	-6,78

Из табл. 5 видно, что фактическое среднее значение рассеивания параметров двигателей больше оговоренного ГОСТ.

Анализ параметров по опытным данным двигателей серии АР показывает, что хотя по некоторым показателям имеется значительный запас по сравнению с регламентированными значениями, однако в настоящее время большие разбросы ограничивают возможность повышения номинальных значений выходных параметров до средних фактических. Учет же точности технологии позволит более обоснованно подойти к ограничению разбросов и назначению самих номинальных параметров.

Разброс выходных параметров обусловлен колебаниями входных параметров: основных размеров с их допусками, стабильностью показателей применяемых материалов, технологией изготовления двигателей, качеством сборки и большим количеством других случайных факторов. Поэтому определение входных параметров должно быть также

статистическим. С целью снижения разбросов выходных параметров необходимо оценить доленое влияние каждого входного параметра. Исследование входных параметров и определение их долевого влияния позволит установить экономически обоснованный минимальный разброс параметров, который целесообразно обеспечить ужесточением контроля или изменением технологии изготовления.

Проведенный анализ выходных параметров по результатам типовых и контрольных испытаний двигателей серии АР методами математической статистики позволяет сделать следующие выводы:

1. Распределение выходных параметров подчиняется нормальному закону.

2. По некоторым показателям имеется значительный запас по сравнению с регламентированными значениями, однако в настоящее время большие разбросы ограничивают возможности повышения номинальных значений выходных параметров до средних фактических.

3. С целью уменьшения поля рассеивания выходных параметров необходимо установить их взаимосвязь с входными, и оценить доленое влияние разброса каждого выходного параметра для создания рациональной экономически обоснованной системы допусков, технологии и контроля. Это позволит приблизить номинальные значения выходных параметров до средних фактических и точнее использовать возможности, заложенные в конструкции, и тем самым повысить технический уровень двигателей серии АР.

4. Твердая шкала начальных пусковых моментов, принятая в серии АР, не является рациональной. При максимальной унификации узлов и деталей двигателей различных полюсностей в одном и том же габарите целесообразнее устанавливать не жесткую шкалу, что позволяет повысить начальные пусковые моменты у многополюсных двигателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Г. Сорокер, О. Д. Гольдберг. Статистический контроль качества асинхронных электродвигателей в серийном производстве. «Вестник электропромышленности», 1956, № 5.

2. О. П. Муравлев. Исследование влияния точностных характеристик на качество и надежность асинхронных электродвигателей. Кандидатская диссертация, Томск, 1966.

3. Б. И. Бурштейн, О. П. Муравлев, Э. К. Стрельбицкий. Рассеивание параметров асинхронных двигателей мощностью от 1 до 70 вт. «Известия ТПИ», т. 190, 1968.

4. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. Физматгиз, М., 1961.

5. В. Е. Гмурман. Введение в теорию вероятностей и математическую статистику. «Высшая школа», М., 1966.

6. С. А. Шелехов. Исследование асинхронных двигателей для привода роликов. Кандидатская диссертация, Томск, 1967.