

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АО2

Э. А. Книпенберг, С. Н. Марухин

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Статистические методы анализа параметров асинхронных электродвигателей позволяют уточнить каталожные данные, установить соответствие разброса параметров допускам по ГОСТ, оценить точность расчета и т. д.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты статистического исследования параметров, полученных при заводских испытаниях трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии АО2-1÷4 габ. основного исполнения. Электродвигатели изготовлены заводом «Сибэлектромотор» и экспериментальным цехом СКБЭ (г. Томск) в 1960—1968 гг.

Под параметрами здесь подразумеваются: фазный ток статора ( $I_0$ ), потери ( $P_0$ ) и коэффициент мощности ( $\cos\varphi_0$ ) холостого хода; фазный ток статора ( $I$ ), к. п. д. ( $\eta$ ), коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ), момент ( $M$ ) и скольжение ( $S$ ) в номинальном режиме; начальный ( $M_K$ ), минимальный ( $M_{\min}$ ) и максимальный ( $M_{\max}$ ) вращающие моменты при пуске; начальный пусковой ток фазы статора ( $I_K$ ), потери короткого замыкания ( $P_K$ ) при номинальном напряжении и др. Эти величины определяются при типовых испытаниях и характеризуют основные режимы работы электродвигателя.

Фактические значения параметров асинхронных электродвигателей имеют разброс, обусловленный технологическими отклонениями, погрешностями измерения и другими случайными факторами, и поэтому могут рассматриваться как случайные величины, имеющие свои распределения. Важно установить закон распределения.

Анализ условий изготовления и испытаний исследуемых электродвигателей, а также данные по другим типам электродвигателей [1÷4], позволяют предположить, что закон распределения параметров является нормальным.

Критерием нормальности распределения являются равенства [5]:

$$\alpha = \iota = 0, \quad (1)$$

где

$\alpha$  — эмпирическая мера косости,

$\iota$  — эмпирическая мера крутости распределения.

Распределение параметров можно считать нормальным, если отклонение от нуля величины  $\alpha$  не превышает  $3\sigma_\alpha$ , а величины  $\iota$  не превышает  $3\sigma_\iota$ . Здесь  $\sigma_\alpha$  и  $\sigma_\iota$  находятся по формулам [5]:

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

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

где  $n$  — количество исследуемых двигателей одного типоразмера. В табл. 1 приведены значения указанных величин для ряда параметров электродвигателей типа АО2-32-4, изготовленных по одним и тем же обмоточным данным.  $\alpha$  и  $t$  определены по методике [5] на ЭЦВМ «Проминь-М».

Таблица 1

Параметр	Величина				
	$n$	$\alpha$	$\alpha \pm 3\sigma_\alpha$	$t$	$t \pm 3\sigma_t$
$I_0$	133	0,442	+1,079..—0,195	0,281	+1,555..—0,993
$P_0$	134	0,619	+1,254..—0,016	0,911	+2,181..—0,359
$\cos\varphi_0$	134	0,680	+1,315..+0,045	0,541	+1,811..—0,729
$I$	133	0,161	+0,798..—0,476	0,921	+2,195..—0,353
$M$	134	0,555	+1,190..—0,080	0,445	+1,715..—0,825
$\eta$	134	—0,303	+0,332..—0,938	0,172	+1,442..—1,098
$\cos\varphi$	133	—0,0314	+0,606..—0,669	—0,125	+1,149..—1,399
$S$	134	0,545	+1,180..—0,090	0,404	+1,674..—0,866
$I_K$	131	—0,281	+0,361..—0,923	—0,186	+1,098..—1,470
$M_K$	126	0,299	+0,954..—0,356	0,734	+2,043..—0,575
$P_K$	131	0,293	+0,935..—0,349	1,499	+2,783..+0,215

Как видно из табл. 1, отклонение  $\alpha$  для рассматриваемых параметров электродвигателя не превышает по абсолютной величине  $3\sigma_\alpha$  (интервал  $\alpha \pm 3\sigma_\alpha$  содержит нуль), за исключением  $\cos\varphi_0$ , для которого это отклонение составляет  $3,22\sigma_\alpha$ . Отклонение  $t$  тоже не превышает ( $3\sigma_t$ ) за исключением  $P_K$ , для которой оно равно  $3,5\sigma_t$ .

Таким образом, распределение подавляющего большинства рассмотренных параметров асинхронного электродвигателя типа АО2-32-4 является нормальным, а распределение  $P_K$  и  $\cos\varphi_0$  — приближенно нормальным. Этот вывод согласуется с данными по другим асинхронным электродвигателям: типа А и АО [1, 3], КАМО-133-2 [2], УАД [4]. Следовательно, можно констатировать, что для довольно широкого класса асинхронных электродвигателей распределение параметров является нормальным или приближенно нормальным.

Нормальный закон распределения случайной величины полностью определяется двумя характеристиками — математическим ожиданием и дисперсией. Поскольку эти характеристики для случайных величин (параметров электродвигателей) нам неизвестны, воспользуемся их оценками, вычисленными по опытными данным. Оценки должны быть состоятельными, несмещенными и эффективными [6]. Для нормального закона вычисленное среднее значение  $\bar{X}$  удовлетворяет этим требованиям. Если в качестве меры рассеяния взять «исправленную» статистическую дисперсию  $\bar{D}$  [6], то она будет состоятельной, несмещенной и «асимптотически эффективной» оценкой.

Используем средние значения для сравнения фактических (по результатам типовых испытаний) и нормативных (определяемых техническими условиями) параметров электродвигателей.

В табл. 2 приведены результаты статистической обработки ряда параметров 26 типоразмеров электродвигателей серии АО2-1÷4 габ. Там же приведены значения по техническим условиям [7], в соответствии с

Таблица 2

Тип электродвигателя	Параметр												I <sub>к</sub> /I					
	η, %		cos φ		M <sub>макс</sub> /M		M <sub>мин</sub> /M		M <sub>к</sub> /M		I <sub>к</sub> /I							
	n	$\bar{X}$	n	$\bar{X}$	n	$\bar{X}$	n	$\bar{X}$	n	$\bar{X}$	n	$\bar{X}$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
AO2-11-2	17	76,6	78,0	17	0,86	0,86	7	2,59	2,2	7	1,89	0,8	16	2,43	1,9	16	5,02	7,0
AO2-12-2	15	79,0	79,5	15	0,87	0,87	6	2,60	2,2	6	1,98	0,8	15	2,41	1,9	15	5,60	7,0
AO2-11-4	10	71	72,0	10	0,75	0,76	7	2,24	2,2	7	1,80	1,2	10	1,93	1,8	10	3,85	7,0
AO2-12-4	11	73,4	74,5	11	0,77	0,78	7	2,24	2,2	6	1,70	1,2	10	1,91	1,8	10	4,06	7,0
AO2-11-6	10	67,6	68,0	10	0,66	0,65	5	2,27	2,2	5	1,84	1,2	10	1,84	1,8	10	3,26	6,5
AO2-12-6	9	67,7	70,0	9	0,64	0,68	6	2,25	2,2	6	1,91	1,2	9	1,92	1,8	9	3,19	6,5
AO2-21-2	19	80,1	80,5	19	0,88	0,88	5	2,59	2,2	9	1,99	0,8	19	2,28	1,8	19	5,65	7,0
AO2-22-2	16	81,7	83,0	16	0,91	0,89	4	2,51	2,2	5	1,94	0,8	16	2,22	1,8	16	5,49	7,0
AO2-21-4	23	78,2	78,0	23	0,80	0,80	4	2,48	2,2	4	1,57	1,2	21	1,85	1,8	22	5,09	7,0
AO2-22-4	11	80,6	80,0	11	0,81	0,81	4	2,48	2,2	5	1,65	1,2	11	2,04	1,8	11	5,32	7,0
AO2-21-6	13	73,1	73,0	13	0,71	0,71	5	2,26	2,2	6	1,78	1,2	13	1,81	1,8	13	3,82	6,5
AO2-22-6	15	75,7	76,0	15	0,72	0,75	4	2,44	2,2	8	1,91	1,2	15	1,96	1,8	15	4,16	6,5
AO2-31-2	24	83,0	84,5	25	0,90	0,89	4	2,54	2,2	4	1,68	0,8	25	2,07	1,7	24	6,70	7,0
AO2-32-2	34	84,5	85,5	34	0,90	0,89	8	2,56	2,2	8	1,78	0,8	34	2,33	1,7	33	7,25	7,0
AO2-31-4	42	82,3	82,5	42	0,83	0,83	12	2,54	2,2	12	1,92	1,2	39	2,03	1,8	40	5,66	7,0
AO2-32-4	134	83,5	83,5	133	0,84	0,84	9	2,54	2,2	9	2,03	1,2	126	2,13	1,8	131	5,82	7,0
AO2-31-6	19	78,9	79,0	19	0,74	0,75	7	2,30	2,2	12	1,40	1,2	19	1,65	1,8	19	4,80	6,5
AO2-32-6	20	81,3	81,0	20	0,75	0,77	2	2,54	2,2	4	1,38	1,2	20	1,74	1,8	20	5,23	6,5
AO2-41-2	31	85,6	87,0	31	0,88	0,90	4	2,82	2,2	4	1,70	0,8	29	2,04	1,6	29	6,90	7,0
AO2-42-2	37	87,4	88,0	37	0,90	0,91	3	2,77	2,2	6	1,50	0,8	33	2,19	1,6	33	7,16	7,0
AO2-41-4	30	85,5	86,0	30	0,86	0,85	7	2,20	2,0	17	1,28	0,8	29	1,40	1,5	30	5,41	7,0
AO2-42-4	40	87,1	88,0	41	0,85	0,86	7	2,69	2,0	13	1,70	0,8	41	1,81	1,5	41	6,60	7,0
AO2-41-6	28	81,8	83,0	27	0,77	0,78	6	2,50	1,8	18	1,10	0,8	27	1,42	1,3	28	5,46	6,5
AO2-42-6	28	83,1	84,5	28	0,80	0,79	6	2,43	1,8	9	1,03	0,8	28	1,33	1,3	28	5,77	6,5
AO2-41-8	18	79,6	81,0	18	0,67	0,69	5	2,45	1,7	9	1,15	0,8	17	1,39	1,2	18	4,60	6,0
AO2-42-8	17	80,5	81,5	17	0,71	0,70	2	2,37	1,7	6	0,97	0,8	17	1,29	1,2	17	4,73	6,0

которыми изготавливались исследуемые двигатели, и по каталогу [8]. Кратности начальных пусковых тока и момента в табл. 2 получены делением средних значений соответствующих величин.

Табл. 2 показывает, что по к. п. д. большинство типов электродвигателей имеют фактические значения ниже каталожных. По  $\cos \varphi$  фактические значения отклоняются в обе стороны от каталожных. Поскольку отклонения невелики, то можно считать, что параметры  $\eta$  и  $\cos \varphi$  электродвигателей АО2-1÷4 габ. приблизительно соответствуют каталожным.

Отношение максимального вращающего момента при пуске к номинальному у всех электродвигателей выше каталожного. Наибольшее отношение имеют электродвигатели 4-го габарита, за исключением АО2-41-4. Для этих электродвигателей (в среднем) оно выше каталожного в 1,35 раза, в то время как для остальных электродвигателей — только в 1,10 раза.

Отношение минимального вращающего момента при пуске к номинальному у всех электродвигателей значительно выше каталожного. Причем довольно четко прослеживается тенденция: с увеличением числа полюсов отклонение фактического отношения минимального момента к номинальному от каталожного уменьшается. Так, для 2-полюсных электродвигателей это отношение больше каталожного (в среднем) в 2,26 раза, для 4-полюсных — в 1,58 раза, для 6-полюсных — в 1,40 раза и для 8-полюсных — в 1,32 раза.

Отношение начального пускового вращающего момента к номинальному для электродвигателей АО2-31-6, АО2-32-6, АО2-41-4 меньше каталожного, для остальных электродвигателей — больше каталожного. Наибольшее отклонение имеют 2-полюсные электродвигатели всех габаритов. Для них фактическое отношение начального пускового момента к номинальному в среднем в 1,29 раза больше каталожного.

И, наконец, отношение начального пускового тока к номинальному для электродвигателей АО2-32-2 и АО2-42-2 больше, а для остальных электродвигателей меньше каталожного. Причем отклонение фактического отношения пускового тока к номинальному от каталожного с увеличением габарита уменьшается.

Таким образом, даже такой предварительный анализ показывает, что фактические значения параметров асинхронных электродвигателей серии АО2-1÷4 габаритов (средние значения, полученные при статистической обработке) отличаются от каталожных, причем для некоторых параметров — весьма существенно.

При статистической обработке результатов типовых испытаний исследуемых электродвигателей, кроме средних значений параметров, нами получены значения несмещенной оценки дисперсии  $\overline{D}$ . Для нормального закона распределения, как известно, все значения параметров, полученных на практике, с вероятностью 0,9973 укладываются в пределы  $\pm 3\sqrt{\overline{D}}$ . Следовательно, этими пределами с достаточной точностью можно оценить разброс параметров около среднего значения  $\overline{X}$ . Для удобства будем оценивать разброс половиной поля рассеивания:

$$\delta_x = \frac{300\sqrt{\overline{D}}}{\overline{X}}, \quad \% \quad (4)$$

В табл. 3 приведены предельные значения  $\delta_x$  по (4) для ряда параметров асинхронных электродвигателей серии АО2-1÷4 габ. 26 типоразмеров.

Таблица 3

№ п.п.	Параметр	$\delta_x, \%$	№ п.п.	Параметр	$\delta_x, \%$
1	$I_0$	$5,6 \div 26,3$	8	$\cos \varphi$	$1,4 \div 5,7$
2	$P_0$	$12,6 \div 46,7$	9	$I_K$	$5,4 \div 16,2$
3	$\cos \varphi_0$	$2,8 \div 46,1$	10	$M_K$	$5,3 \div 38,3$
4	$I$	$2,7 \div 8,8$	11	$M_{\text{мин}}$	$5,7 \div 62,6$
5	$M$	$0,9 \div 3,6$	12	$M_{\text{макс}}$	$2,2 \div 17,6$
6	$S$	$19,6 \div 50,8$	13	$P_K$	$3,6 \div 23,3$
7	$\eta$	$1,4 \div 5,0$			

Наибольший разброс имеет минимальный вращающий момент при пуске  $M_{\text{мин}}$ . Велики также разбросы у скольжения в номинальном режиме  $S$ , потерь  $P_0$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi_0$  холостого хода.

По  $\delta_x$  можно оценить использование допусков, установленных ГОСТ 183—66 для параметров асинхронных электродвигателей. В табл. 4 приведены средние значения половины поля рассеивания  $|\overline{\delta_x}|$  и допуск по ГОСТ для ряда параметров асинхронных электродвигателей серии АО2-1÷4 габ. Допуск на  $\eta$  и  $\cos \varphi$  приведен средний.

Таблица 4

Величина	Параметр						
	$\eta$	$\cos \varphi$	$S$	$I_K$	$M_K$	$M_{\text{макс}}$	$M_{\text{мин}}$
$ \overline{\delta_x} /\%$	3,06	3,50	32,07	9,73	20,73	8,58	26,36
Допуск по ГОСТ, %	-3,77	-4,32	+25,0	+15,0	-20,0	-10,0	-20,0

Из табл. 4 видно, что для к. п. д., коэффициента мощности и максимального вращающего момента фактическое рассеяние (в среднем) меньше, а для начального пускового тока — значительно меньше допуска по ГОСТ. Для начального пускового вращающего момента фактическое рассеяние приблизительно соответствует допуску. Несмотря на большой допуск для минимального вращающего момента при пуске и скольжения в номинальном режиме (соответственно — 20% и +25% от номинального значения), фактическое рассеяние этих параметров выше допуска (в среднем на 30%).

Следует отметить, что для окончательного суждения о соответствии фактического рассеяния параметров допускам по ГОСТ необходимо провести аналогичные исследования для электродвигателей, выпускаемых на других заводах СССР.

### Выводы

Для исследованных электродвигателей серии АО2-1÷4 габ. на основе анализа результатов типовых испытаний статистическими методами можно сделать следующие выводы:

1. Распределение параметров электродвигателей является нормальным или приближенно нормальным.
2. Фактические средние значения параметров отличаются от каталожных, а для некоторых параметров — значительно.
3. Использование допусков по ГОСТ является весьма неравномерным для различных параметров.

Результаты статистической обработки параметров, приведенные в табл. 1—4, могут быть использованы в качестве уточненного справочного материала в различных расчетах и исследованиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Г. Сорочер, О. Д. Гольдберг. Статистический контроль качества асинхронных электродвигателей в серийном производстве. «Вестник электропромышленности», 1956, № 5.
  2. И. П. Исаев. Статистическая оценка стабильности характеристик асинхронных двигателей. «Электричество», 1957, № 4.
  3. О. П. Муравлев. Исследование влияния точностных характеристик на качество и надежность асинхронных электродвигателей. Кандидатская диссертация, Томск, 1966.
  4. Б. И. Бурштейн, О. П. Муравлев, Э. К. Стрельбицкий. Рассеивание параметров асинхронных двигателей мощностью от 1 до 70 *вт*. Известия ТПИ, т. 190, 1968.
  5. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. Физматгиз, М., 1961.
  6. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. Изд. 3-е. «Наука», М., 1964.
  7. МРТУ 2-015-002-62. Двигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые серии А2 и АО2 мощностью от 0,6 до 100 *квт*.
  8. Информация 01. 01. 02—65. Асинхронные электродвигатели трехфазного тока мощностью от 0,6 до 100 *квт*. Новая единая серия А2 и АО2.
-