

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЛУЧАЙНЫХ РЕЖИМАХ

Ю. М. БАШАГУРОВ, Д. И. САННИКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и аппаратов  
и общей электротехники)

Важным моментом при исследовании нагрева и износа изоляции обмоток электродвигателей в случайных режимах является получение закона распределения температуры. В некоторых случаях эти законы можно получить применением теории случайных функций и рассмотрением двигателя как динамической системы. Такой подход является наиболее естественным и до некоторой степени универсальным при тепловых исследованиях электродвигателей в случайных режимах. Однако аналитическое определение закона распределения на выходе динамической системы связано, как правило, со сложными вычислениями, поскольку применение общей теории случайных процессов в данном случае требует знания многомерных законов распределения входного процесса.

О свойствах закона распределения на выходе динамической системы предварительно можно судить, исходя из качественных рассуждений о нормализации случайного процесса, проходящего через линейную динамическую инерционную систему [1]. Их смысл, применительно к асинхронным электродвигателям, в основном сводится к следующему: закон распределения ординат выходного процесса  $\Theta(t)$  будет тем ближе к нормальному, чем больше будет постоянная нагревания обмотки и чем быстрее будет убывать корреляционная связь входного процесса  $I(t)$ .

Приведенные в [1] рассуждения о нормализации входного процесса носят часто качественный характер и только поясняют существо дела. Для того чтобы с уверенностью можно было считать процесс  $\Theta(t)$  обмотки статора асинхронного двигателя нормальным, необходимо провести эксперимент, подтверждающий правильность принятых положений.

Задачей эксперимента является получение закона распределения превышения температуры обмотки асинхронных двигателей при известных законах распределения и корреляционных функциях нагрузки.

Для исследования были отобраны и смоделированы режимы наиболее изученной группы нагрузок — асинхронных двигателей металлорежущего оборудования [2]. Рассматриваемые процессы нагрузки имеют экспоненциальный закон распределения

$$p(I) = \lambda \exp(-\lambda I), \quad (1)$$

где

$\lambda = \frac{1}{m(I)}$  — параметр распределения,  
 $m(I)$  — среднее значение нагрузки,  
 и нормированные корреляционные функции вида

$$R_I(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}, \quad (2)$$

где

$\alpha$  — параметр корреляционной функции (в указанных режимах находится в пределах  $0,01 \div 0,1$  1/сек).

Специфические особенности экспоненциального распределения нагрузки определяют выбор асинхронного двигателя не из условия нагрева, а только из условия обеспечения максимального электромагнитного момента. Для более эффективного использования асинхронных двигателей при экспоненциальном распределении нагрузки возникает задача максимального использования их перегрузочной способности и, следовательно, исследования нагрева и износа изоляции обмоток при предельных (по  $M_{\max}$ ) режимах.

Учитывая вышеизложенное, при испытании асинхронных двигателей параметры экспоненциального закона выбраны так, чтобы максимальные пиковые нагрузки по току доходили до значений  $I_{\max}$ , соответствующих значению максимального момента не ниже каталожного.

Реализации нагрузки были получены на ЭЦВМ БЭСМ-4 методом статистического моделирования [3] при различной величине автокорреляционной связи.

Испытывались двух-, четырех- и шестиполюсные асинхронные двигатели единой серии 4А с высотой оси вращения 112 мм. Средний перегрев обмотки статора измерялся методом заложенных в обмотку термпар. График температуры от времени регистрировался с помощью самопишущего милливольтметра типа НЗ9 со скоростью протягивания диаграммной ленты 600 мм/час.

Подача заданного режима  $I(t)$  на вход испытываемого двигателя осуществлялась следующим образом.

С помощью самопишущего амперметра типа НЗ76, включенного в цепь электродвигателя, «копировался» по току и времени смоделированный и нанесенный на диаграммную ленту заданный режим  $I(t)$ . Изменение нагрузки осуществлялось с помощью регулятора независимого возбуждения нагрузочного генератора.

Естественно, что точно воспроизвести заданный и зафиксированный на диаграммной ленте режим нагрузки невозможно. Следует добавить, что и сам метод моделирования случайных процессов, изложенный в [3], не позволяет получить случайные процессы, ординаты которых будут точно распределены по заданному закону, так как известно, что случайная величина, полученная как сумма случайных независимых (или слабо зависимых) чисел, распределенных по любому закону, уже не будет подчиняться строго заданному закону, а сколько угодно будет приближаться к нормальному [4]. Поэтому с целью контроля и уточнения параметров заданного режима вновь записанный режим  $I(t)$  обрабатывался.

Предварительный анализ диаграмм температуры показал, что значения минимальных периодов колебаний нагрузки  $T_{\min}$ , соответствующих высокочастотным составляющим процесса  $\omega_{\max}$ , колеблются в пределах  $100 \div 150$  сек. Обработка процесса на ЭЦВМ проводилась согласно [4] при шаге дискретности  $\Delta t = 15$  сек. Число интервалов квантования по уровню, учитывая рекомендации [5], принимали равным 12.

Необходимая длина реализаций определена методом, указанным в [6]. Задавая значение половины доверительного интервала  $L=0,1$  и доверительной вероятностью  $\beta_c=0,99$  по таблицам  $\beta_c=f(L, n)$ , получаем объем выборки  $n=450$ . Длина реализации нагрузки  $T$  при  $\Delta t=15$  сек составляет в данном случае 2 часа.

Для исключения погрешности от влияния нестационарного начального участка процесса  $\Theta(t)$  испытания двигателей в заданном режиме начинались со средней температуры, которую можно приближенно определить по формуле

$$\bar{\theta} = \theta_n \left( \frac{\bar{I}_1}{I_n} \right)^2, \quad (3)$$

где

$\theta_n$  — превышение температуры обмотки при номинальном режиме, °С;

$\bar{I}_1$  — заданная средняя нагрузка, а.

Т а б л и ц а

Тип двигателей	$\bar{I}_1/I_n$	$\alpha, 1/\text{сек}$	$T, \text{час}$	$\bar{\theta}, \text{град}$	$ A $	$3\sqrt{D(E)}$	$(E)$	$5\sqrt{D(E)}$
4A112M2	10,9/15,2	0,01	2,0	55	0,0008	0,94	0,14	0,98
		0,03	2,0	56	0,37*	0,33	0,37	1,09
		0,003	2,1	67	0,031	0,33	0,57	1,08
		0,001	2,2	60	0,018	0,32	0,012	0,21
4A112M4	9,67/11,23	0,01	2,3	73	0,46*	0,29	0,17	0,96
		0,001	2,4	84	0,027	0,30	0,31	1,00
		0,03	2,1	75	0,54*	0,33	0,78	1,46
		0,1	2,1	83	0,007	0,33	0,64	1,46
4A112MB6	8,25/9,25	0,001	2,4	56	0,76*	0,31	0,40	1,01
		0,003	2,4	60	1,037*	0,35	0,76	1,01
		0,1	1,5	54	1,09*	0,39	0,79	1,28
		0,01	2,3	64	0,53	0,61	0,24	0,93

В результате статистической обработки реализаций процесса  $\Theta(t)$  на ЭЦВМ были получены гистограммы, средние значения, второй, третий и четвертый центральные моменты.

Исходя из предположения о нормальности опытных распределений было проведено определение отклонения их от нормального закона

$$p(\theta) = \frac{1}{\sigma(\theta)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\theta - \bar{\theta})^2}{2\sigma^2(\theta)}\right] \quad (4)$$

при помощи приближенного критерия согласия, основанного на вычислении дисперсий асимметрии  $D(A)$  и эксцесса  $D(E)$ . Согласно этому критерию наблюдаемое распределение считается нормальным, если удовлетворяются неравенства

$$|A| \leq 3\sqrt{D(A)} \text{ и } |E| \leq 5\sqrt{D(E)}. \quad (5)$$

Результаты испытаний и проверки согласия приведены в таблице 1. Звездочкой отмечены значения абсолютных значений асимметрии, не удовлетворяющих условиям (5).

## Выводы

При рассмотрении электродвигателя как динамической системы экспериментально установлено, что распределение температуры обмотки асинхронных двигателей в режимах работы металлорежущего оборудования можно считать подчиненным нормальному закону.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Свешников. Прикладные методы теории случайных функций. М., «Наука», 1969.
  2. Ю. М. Башагуров, Э. К. Стрельбицкий. Учет режимов нагрузки при проектировании асинхронных двигателей. Известия ТПИ, т. 212, 1971.
  3. Н. П. Бусленко. Математическое моделирование производственных процессов. М., «Наука», 1964.
  4. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1962.
  5. Г. Корн. Моделирование случайных процессов на аналоговых и аналого-цифровых машинах. М., «Мир», 1968.
  6. Р. Мэнли. Анализ и обработка записей колебаний. М., «Машиностроение», 1972.
-