

**ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ РОЛЬГАНГОВЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ  
ПОГРЕШНОСТЯМ**

В. В. ДНЕПРОВСКИЙ, О. П. МУРАВЛЕВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Потребность для индивидуального привода роликов транспортных и рабочих рольгангов, а также для других приводов металлургической промышленности СССР в основном удовлетворяется двигателями серии АР, выпускаемыми по ГОСТу 10283-69. Выбор двигателей для рабочих рольгангов производится по динамической постоянной [1] и по требуемому для желательного времени пуска и торможения моменту вращения. Ускорение маховых масс должно произойти в возможно короткое время, поэтому желателен высокий средний момент ускорения во время пуска.

Большие разбросы значений динамической постоянной и вращающего момента приводят к отступлению от предусмотренного технологического процесса прокатки, что влияет на качество выпускаемых изделий. Погрешность же, получаемая при определении времени пусков и торможений, за счет выбора двигателей по каталожным данным, которые отличаются от фактических, сказывается в расчете средних потерь за цикл и в ожидаемом перегреве двигателя. Для привода транспортных рольгангов двигатели выбираются в соответствии с нагрузкой транспортера для продолжительного режима работы или для соответствующей условиям эксплуатации относительной продолжительности включения.

Двигатели рабочих и транспортных рольгангов в большинстве случаев работают группами. Известно, что действительные величины конструктивно-технологических параметров однотипных двигателей, выпущенных заводом, несколько отличаются от номинальных, в силу чего и сами характеристики двигателей отличаются от номинальных. Это обстоятельство вызывает неравенство нагрузок двигателей, работающих параллельно в одной системе привода, что обычно является нежелательным.

В связи с этим представляет практический интерес оценка влияния разброса технологических погрешностей на стабильность технических характеристик и создание инженерных методов расчета допусков технических характеристик на стадии проектирования.

Основными техническими характеристиками (выходными параметрами) рольганговых двигателей будем считать следующие: пусковой и максимальный момент, пусковой ток, к. п. д.,  $\cos\varphi$ , динамическую постоянную и скольжение.

Под независимыми переменными (входными параметрами) будем понимать конструктивно-технологические параметры, в качестве которых выбрано число витков, диаметр провода, длина полувитка, удельное сопротивление материала клетки ротора, величина воздушного зазора,

длины пакетов статора и ротора и количество стержней обмотки ротора. (Обозначения входных и выходных параметров, а также параметров схемы замещения приведены в приложении).

Одним из основных требований асинхронных рольганговых двигателей является точность их технических характеристик, заданная ГОСТом.

Выходные параметры  $y_i$  можно рассматривать как функции входных параметров  $x_j$

$$y_i = \varphi_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m), \quad (i = 1, 2, \dots, l; j = 1, 2, \dots, m); \quad (1)$$

При изготовлении изделий входные параметры, а следовательно, и выходные параметры из-за влияния технологических факторов и свойств применяемых материалов имеют отклонения от номинальных значений. В этом случае, основываясь на основных положениях теории точности [2, 3] и учитывая, что величины  $x_j$  и  $y_i$  являются случайными [4], отклонение выходного параметра для относительных величин может быть представлено в виде

$$\frac{\Delta y_i}{y_i} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial \varphi_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m)}{\partial x_j} \cdot \frac{x_j}{\varphi_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m)} \cdot \frac{\Delta x_j}{x_j}; \quad (2)$$

Выражение (2) функционально связывает полное отклонение выходного параметра с частными отклонениями входных параметров.

Коэффициенты выражения (2), стоящие перед погрешностями входных параметров и определяющие степень влияния этих погрешностей на погрешность выходного параметра, называются коэффициентами влияния

$$C_{ij} = \frac{\partial \varphi_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m)}{\partial x_j} \cdot \frac{x_j}{\varphi_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m)}. \quad (3)$$

Чтобы получить численное значение коэффициента влияния, нужно в выражение (3) подставить расчетные номинальные значения входных параметров. Для получения допусков на выходные параметры по вероятностному методу [5] необходимо знать численные значения коэффициентов уравнений для основных погрешностей и разбросы входных параметров.

Цель настоящей работы — определение и анализ коэффициентов влияния входных параметров на выходные для асинхронных рольганговых двигателей.

При наличии несложных аналитических выражений типа (1) выходного параметра как функции входных параметров расчет коэффициентов влияния производится непосредственно по выражению (3).

Для асинхронных рольганговых двигателей аналитические выражения, связывающие выходные параметры  $y_i$  с входными  $x_j$ , будут представлять собой сложные функции. Кроме того, в технической литературе используются в основном аналитические уравнения, связывающие выходные параметры с параметрами схемы замещения и уравнения связи параметров схемы замещения с входными параметрами.

$$z_k = \varphi_k(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m), \quad (k = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m), \quad (4)$$

где

$z_k$  — параметры схемы замещения.

В этом случае определение коэффициентов  $C_{ij}$  осуществляется следующим образом:

1. Вычисляют матрицу А коэффициентов влияния параметров схемы замещения на выходные параметры.
2. Вычисляют матрицу В коэффициентов влияния входных параметров на параметры схемы замещения.

3. Определяют искомые коэффициенты матрицы С перемножением коэффициентов матриц А и В.

$$C = A \cdot B. \quad (5)$$

Для определения коэффициентов влияния параметров схемы замещения на динамическую постоянную использовалась следующая аналитическая зависимость [6]

$$D = \frac{Q_{\text{доп}} - 3600 \left[ \frac{3U_1^2 r_1}{(x_1 + x_m)^2} + P_o' \right] \text{ПВ}}{\frac{n_c^2}{730} \left[ 1 + \frac{r_1}{r_2'} \left( 1 + \frac{2x_k}{x_1 + x_m} \right) \right]}, \quad (6)$$

где  $Q_{\text{доп}} = 3600 \cdot \theta_{\text{ст}} \cdot S_{\text{охл}} \cdot \alpha$  — допустимое количество тепла, развиваемое двигателем в час;

$\theta$  — допустимое превышение температуры обмотки статора;

$S_{\text{охл}} = \pi D_a \left( \frac{D_a}{2} + l_1 \right)$  — поверхность охлаждения по активным размерам железа;

$D_a$  — внешний диаметр пакета статора;

$l_1$  — длина пакета статора;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;

$U_1$  — фазное напряжение;

$P_o' = p_{\text{ст}} + p_{\text{мех}}$  — сумма стальных и механических потерь;

ПВ — продолжительность включения;

$n_c$  — синхронная скорость вращения.

По формулам, полученным на основании (3, 6), и известным аналитическим выражениям взаимосвязи технических характеристик с параметрами схемы замещения и уравнений, связывающих параметры схемы замещения с конструктивно-технологическими параметрами были вычислены коэффициенты влияния матриц А, В и С.

Ниже приводится матрица средних значений коэффициентов  $C_{ij}$  по всей серии и матрицы коэффициентов изменчивости.

Матрица средних значений коэффициентов  $C_{ij}$

	w	d <sub>пр</sub>	l <sub>m</sub>	ρ	δ	l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	z <sub>2</sub>
M <sub>к</sub>	-1,735	0,570	-0,428	0,160	0,350	-0,317	-0,261	0,302
M <sub>м</sub>	-1,722	0,555	-0,394	0	0,289	-0,262	-0,337	0,372
I <sub>к</sub>	-1,859	0,285	-0,214	-0,421	0,175	-0,158	-0,602	0,624
η	-0,186	0,268	-0,134	-0,164	-0,116	0,136	-0,153	0,153
cosφ	0,836	-0,164	0,077	0,071	-0,276	0,322	0,057	-0,056
D	0,458	0,756	-0,390	0,350	-0,102	0,127	0,284	-0,282
S	2,420	0,240	-0,110	1,206	-0,026	0,022	1,170	-1,175

Матрица коэффициентов изменчивости  $C_v$

	0,0756	0,219	0,196	0,620	0,287	0,193	0,268	0,193
	0,0341	0,212	0,191	0	0,240	0,170	0,172	0,132
	0,0309	0,219	0,195	0,114	0,286	0,192	0,0804	0,0652
C <sub>v</sub> =	1,6640	0,523	0,515	0,462	0,850	0,864	0,522	0,527
	0,2890	0,809	0,909	0,429	0,283	0,257	0,675	0,718
	0,2780	0,191	0,190	0,149	0,572	0,582	0,132	0,134
	0,0953	0,571	0,576	0,089	0,663	0,606	0,113	0,113

Матрица средних значений коэффициентов  $C_{ij}$  представляет собой средние значения коэффициентов влияния входных параметров на вы-

ходные по всей серии рольганговых двигателей, поэтому отклонения выходных параметров, подсчитанные на основании этих матриц, будут отражать общую картину всей серии. Из матрицы средних значений коэффициентов можно видеть, что различные выходные параметры серии по-разному реагируют на одни и те же отклонения входных параметров. Кроме того, большинство коэффициентов влияния  $C_{ij}$ , как это видно из матрицы  $C_v$ , имеют большую изменчивость в зависимости от типоразмеров двигателей, поэтому принятие конструктивных решений с целью минимизации чувствительности выходных параметров к изменению входных параметров должно проводиться для конкретных типов двигателей.

Учитывая целый ряд конструктивных особенностей асинхронных рольганговых двигателей (большое разнообразие типов двигателей по количеству полюсов, заливка роторов специальным сплавом с пониженной электропроводностью и т. д.), а также введение, по сравнению с двигателями обычного исполнения, одной из основных технических характеристик — динамической постоянной, дополнительно были определены следующие коэффициенты влияния.

Коэффициенты влияния  $C_{4,9}$ ,  $C_{4,10}$  потерь в стали и механических на коэффициент полезного действия, потерь холостого хода на коэффициент мощности и динамическую постоянную  $C_{5,14}$ ,  $C_{6,14}$ , продолжительности включения, суммарных потерь в стали и механических и коэффициента теплоотдачи на динамическую постоянную  $C_{6,11}$ ,  $C_{6,12}$ ,  $C_{6,13}$ . Чувствительность остальных выходных параметров не зависит от изменения вышеуказанных входных и соответствующие коэффициенты влияния тождественно равны нулю.

Вывод формул для определения коэффициентов влияния  $C_{4,9}$ ,  $C_{4,10}$ ,  $C_{5,14}$ ,  $C_{6,14}$ ,  $C_{6,11}$ ,  $C_{6,12}$ ,  $C_{6,13}$  производился по выражениям (3, 6), а также на основании общеизвестных аналитических зависимостей из курса электрических машин. Средние значения этих коэффициентов влияния для всей серии и коэффициенты изменчивости приведены в табл. 1.

Таблица 1

$C_{ij}$	Среднее значение	Коэффициент изменчивости
$C_{4,9}$	-0,0561	0,3780
$C_{4,10}$	-0,0157	0,4450
$C_{5,14}$	0,1750	0,6650
$C_{6,11}$	-0,0771	0,4760
$C_{6,12}$	-0,0371	0,2290
$C_{6,13}$	1,0760	0,0330
$C_{6,14}$	-0,2090	0,6600

### Выводы

1. Получены аналитические зависимости и вычислены коэффициенты влияния входных параметров на выходные для рольганговых двигателей, которые могут быть использованы для расчета допусков на выходные параметры и по-новому оценить существующие величины допусков на технические характеристики.

2. Вычисленные коэффициенты влияния позволяют при заданных допусках на выходные характеристики технически обоснованно принимать допуски на конструктивно-технологические параметры. Это позволит стабилизировать величину технических характеристик и более обос-

новано подходить к назначению самих номинальных значений с целью повышения технического уровня двигателей.

## Приложение

Для параметров рольганговых двигателей введены следующие обозначения.

### 1. Выходные параметры

- $y_1$ — $M_k$  — пусковой момент;
- $y_2$ — $M_M$  — максимальный момент;
- $y_3$ — $I_k$  — ток короткого замыкания;
- $y_4$ — $\eta$  — коэффициент полезного действия;
- $y_5$ — $\cos\varphi$  — коэффициент мощности;
- $y_6$ — $D$  — динамическая постоянная;
- $y_7$ — $S$  — скольжение.

### 2. Параметры схемы замещения

- $z_1$ — $r_1$  — активное сопротивление обмотки статора;
- $z_2$ — $r_2'$  — приведенное активное сопротивление обмотки ротора;
- $z_3$ — $x_1$  — индуктивное сопротивление короткого замыкания;
- $z_4$ — $x_m$  — индуктивное сопротивление взаимной индукции.

### 3. Входные параметры

- $x_1$ — $\omega_1$  — число витков фазы обмотки статора;
- $x_2$ — $d_{np}$  — диаметр изолированного провода обмотки статора;
- $x_3$ — $l_m$  — длина полувитка обмотки статора;
- $x_4$ — $\rho$  — удельное сопротивление материала беличьей клетки ротора;
- $x_5$ — $\delta$  — величина воздушного зазора;
- $x_6$ — $l_1$  — длина пакета статора;
- $x_7$ — $l_2$  — длина пакета ротора;
- $x_8$ — $Z_2$  — число целых стержней обмотки ротора;
- $x_9$ — $r_{ст}$  — потери в стали;
- $x_{10}$ — $r_{мех}$  — потери механические;
- $x_{11}$ — $ПВ$  — продолжительность включения;
- $x_{12}$ — $r_{ст} + r_{мех}$  — суммарные потери в стали и механических;
- $x_{13}$ — $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;
- $x_{14}$ — $r_0$  — потери холостого хода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 10283-69. Двигатели трехфазные короткозамкнутые асинхронные рольганговые серии АР.
2. Н. А. Бородачев. Анализ качества и точности производства. Машгиз, М., 1946.
3. В. П. Гусев, А. В. Фомин и др. Расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры. «Советское радио», М., 1963.
4. И. П. Исаев. Допуски на характеристики электрических локомотивов. Трансжелдориздат, М., 1958.
5. О. П. Муравлев, Э. К. Стрельбицкий. Обеспечение необходимой точности при производстве асинхронных двигателей. — «Электротехника», 1966, № 7.
6. Техническая информация ОТЭ.143.001. Асинхронные рольганговые электродвигатели серии АР2 с пусковыми моментами от 1 до 55 кгм на скорости вращения от 150 до 1500 об/мин. Томск, 1967.