

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ НА ИСКРЕНИЕ ЩЕТОК В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ, В. С. СТУКАЧ, А. Я. ЦИРУЛИК

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Основной причиной искрения электрощеток является неидентичность коммутационных циклов, обусловленная технологическими отклонениями параметров геометрии основных узлов машины постоянного тока. Поэтому для повышения надежности коммутационного узла возникает необходимость в обоснованной системе допусков на влияющие на коммутацию технологические отклонения. В линейной теории точности дисперсия выходной величины связывается с дисперсиями входных величин уравнением

$$D(y) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial y(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \right]^2 \cdot D(x_i), \quad (1)$$

где

$D(y)$  — дисперсия величины  $y$ , характеризующей коммутацию машин серии;

$D(x_i)$  — дисперсия  $i$ -того входного технологического параметра  $x_i$ , влияющего на показатель коммутации  $y$ ;

$y(x_1, x_2, \dots, x_n)$  —  $n$ -мерная функциональная зависимость показателя коммутации  $y$  от входных технологических параметров  $x_i$ . Из формулы (1) видно, что, зная дисперсии входных параметров для данного уровня технологии, можно вычислить дисперсию показателя коммутации машин серии и вероятность брака по искрению. Можно решать и обратную задачу — при заданной дисперсии показателя искрения и заданной допустимой вероятности брака вычислить допуски на отклонения входных параметров. Как видим, задача решалась бы просто, если бы была известна зависимость показателя искрения от входных параметров  $y(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Определение этой зависимости является целью данной работы.

В статье [1] показано, что наиболее эффективным методом поиска указанной зависимости является экспериментально-статистический метод. Выбранные входные параметры варьируют в эксперименте по плану, построенному в соответствии с требованиями теории математического планирования эксперимента. В каждом опыте измеряется показатель коммутации, в качестве которого мы принимаем непосредственно уровень искрения щеток, определенный по осциллограмме напряжения на сбегавшем крае щеток с помощью заранее найденной зависимости между искрением и параметрами осциллограммы [2]. Вид неизвестной функции  $y(x_1, x_2, \dots, x_n)$  задается полиномом требуемой степени. Неизвестные коэффициенты полинома определяются методами

регрессионного анализа результатов эксперимента, аппарат которого изложен в статье [1]. Там же приведены предварительные результаты поиска математической модели искрения. В настоящей статье излагаются окончательные результаты исследования.

Наиболее заметное влияние на коммутацию оказывают технологические отклонения параметров геометрии магнитной системы и коллекторно-щеточного узла. Параметры этих основных узлов и были приняты к рассмотрению.

Для уменьшения размерности модели искрения, сокращения объема эксперимента и трудоемкости расчетов желательно все технологические факторы представить минимальным числом параметров. Отдельные узлы в общей модели можно представить обобщающими параметрами, выходными для этих узлов.

Геометрия магнитной системы характеризуется шестью зазорами:  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — зазоры между главными полюсами и якорем соответственно слева и справа от дополнительного полюса;

$s_1$  и  $s_2$  — зазоры между наконечниками главного и дополнительного полюса слева и справа от последнего;

$\delta_d$  — зазор между якорем и дополнительным полюсом;

$\delta_s$  — зазор между станиной и дополнительным полюсом.

Исследования В. Г. Галкина показали, что отклонения всех этих зазоров приводят к отклонению индукции под дополнительным полюсом и дисперсия индукции определяется через дисперсии зазоров следующим образом [3]:

$$D(B_d) = A_1 \cdot D(\delta_d) + A_2 \cdot D(\delta_s) + A_3 \cdot D(s) + A_4 \cdot D(\delta), \quad (2)$$

где коэффициенты  $A_i$  определяются через номинальные размеры геометрии магнитопровода. Как видно, отклонение индукции в зоне коммутации может служить выходным параметром для узла магнитопровода и представлять этот узел в модели искрения. Так как измерение индукции на серийных машинах сложно, выразим ее отклонение через ток подпитки обмотки дополнительного полюса:

$$\Delta I_d \cdot w_n = I_n \cdot w_d = \frac{1}{\mu_0} \cdot \Delta B_d \cdot \delta_d \cdot k \delta. \quad (3)$$

Дисперсия тока подпитки определяется дисперсией индукции:

$$D(I_n) = \left[ \frac{1}{\mu_0 \cdot w_d} \cdot \bar{\delta}_d \cdot \bar{k} \delta \right]^2 \cdot D(B_d). \quad (4)$$

Таким образом, дисперсию индукции можно заменить дисперсией тока подпитки, и ток подпитки принять в качестве обобщающего параметра магнитопровода. При проведении эксперимента для каждой машины определялся оптимальный ток подпитки по виду осциллограммы напряжения на сбегавшем крае щетки. При варьировании  $I_n$  отсчет производился от этого оптимального значения  $I_{по}$  как от нулевого значения. Это исключило влияние состояния механики скользящего контакта, влияющего на величину оптимального тока подпитки.

В качестве параметров коллекторно-щеточного узла приняты контактное нажатие  $P$ , эксцентриситет рабочей поверхности коллектора  $e$ , эллиптичность поверхности коллектора  $\rho$ , среднеквадратическое отклонение перепадов уровней пластин  $\sigma_d$ . Параметры коллектора определялись из профилограмм, как описано в [4]. Статистический анализ профилограмм, коллекторов машин серии П1-6 габаритов показал, что закон распределения перепадов пластин нормальный со средним, равным нулю, поэтому параметр  $\sigma_d$  полностью определяет закон распределения перепадов и однозначно определяет вероятность появления одного, двух

и т. д. перепадов, превышающих критический уровень, при котором невозможна безыскровая коммутация.

Предварительные отсеивающие эксперименты позволили выявить и отбросить несущественные для исследуемых машин факторы. При скорости вращения якоря 1500 об/мин. эксцентриситет и эллиптичность коллектора оказались слабо влияющими при изменении их в пределах допуска. Таким образом, выходными параметрами модели искрения оказались ток подпитки  $I_n = x_1$ , представляющий шесть параметров магнитной цепи, контактное нажатие  $P = x_2$  и параметр коллектора  $\sigma_{\Delta} = x_3$ . Выходной величиной является уровень искрения  $I$  в баллах.

Вид модели искрения задаем полиномом второй степени:

$$I = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^3 b_{ij} x_i x_j. \quad (5)$$

Интервалы варьирования переменных в эксперименте (табл. 1) назначены на основе анализа действительных полей их рассеивания применительно к технологии завода «Электромашина» (г. Прокопьевск). Параметр  $\sigma_{\Delta}$  изменялся подбором машин с соответствующими коллекторами.

Таблица 1

Входные параметры		$I_{н,а}$	$\frac{P}{100}, \text{ г}$	$\sigma_{\Delta}, \mu\text{к}$
Их кодовые обозначения		$x_1$	$x_2$	$x_3$
Средний уровень	(0)	0	3,7	1,045
Единица варьирования	(±)	1,0	1,0	0,325
Верхний уровень	(+)	+1,0	4,7	1,370
Нижний уровень	(-)	-1	2,7	0,720
Звездное плечо	(+1,682)	+1,682	5,38	1,592
Звездное плечо	(-1,682)	-1,682	2,02	0,498

Входные параметры варьировали согласно центральному композиционному ротатабельному равномерному плану второго порядка, представленному в табл. 2 [5]. В этой таблице даны также значения искрения по визуальной оценке и по объективной оценке на основе параметров сигнала.

Таблица 2

№ опытов	Планирование			Уровень искрения $I$	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	визуально	по осциллограмме
1	+	+	+	2	1,71
2	-	+	+	1,5	1,45
3	+	-	+	2	1,75
4	-	-	+	2	2,16
5	+	+	-	1,25	1,17
6	-	+	-	1	0,80
7	+	-	-	1	0,95
8	-	-	-	2	1,70
9	+1,682	0	0	2	2,20
10	-1,682	0	0	2	2,00
11	0	+1,682	0	1	0,70
12	0	-1,682	0	1,25	1,15
13	0	0	+1,682	1,5	1,67
14	0	0	-1,682	1	0,30
15 ÷ 20	0	0	0	1	0,70

После обработки эксперимента получаем следующую зависимость искрения щеток от выбранной системы параметров:

$$I = 2,523 - 0,114 \cdot I_{\text{п}} - 1,1 \cdot P - 0,761 \cdot \sigma_{\Delta} + 0,0077 \cdot I_{\text{п}}^2 + 0,156 \cdot P^2 + \\ + 0,894 \cdot \sigma_{\Delta}^2 + 0,0336 \cdot I_{\text{п}} \cdot P + 0,0108 \cdot I_{\text{п}} \cdot \sigma_{\Delta} - 0,033 \cdot P \cdot \sigma_{\Delta} .$$

Здесь  $I_{\text{п}}$  — в % от  $I_{\text{н}}$ ,  $P$  — в сотнях граммов на 1 см<sup>2</sup>,  $\sigma_{\Delta}$  — в микронах.

Для проверки адекватности полученной модели искрения вычисляем остаточную сумму квадратов отклонений теоретических значений  $\hat{I}$  от опытных значений  $I$ :

$$S_R = \sum_{k=1}^{20} (I_k - \hat{I}_k)^2 = 0,135. \quad (7)$$

Множественный коэффициент корреляции, характеризующий адекватность модели,

$$R = \sqrt{1 - \frac{S_R}{\sum (I_k - \bar{I}_k)^2}} = 0,989$$

с нижним доверительным пределом  $R_{\text{н}} = 0,96$  при 99 проц. доверительной вероятности. Высокий коэффициент корреляции показывает, что для машин серии П1-6 габаритов со скоростью вращения якоря 1500 об/мин. все существенно влияющие на коммутацию технологические факторы учтены в модели искрения. Среди этих факторов — шесть параметров геометрии магнитной системы и два параметра коллекторно-щеточного узла.

Высокая адекватность полученной зависимости позволяет использовать ее для построения системы допусков на рассмотренные параметры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. К. Стрельбицкий, В. С. Стукач, А. Я. Цирулик. Применение метода математической статистики для исследования коммутации. Известия ТПИ, т. 160, 1966.
2. Э. К. Стрельбицкий, В. С. Стукач, А. Я. Цирулик. Оценка искрения на коллекторе в машинах постоянного тока. Известия ТПИ, настоящий сборник.
3. В. Г. Галкин. Исследование влияния технологических отклонений в геометрии магнитной системы тяговых двигателей на состояние коммутации. Диссертация, Омск, 1965.
4. Э. К. Стрельбицкий, В. С. Стукач, А. Я. Цирулик. Статистическая обработка профилограмм коллектора машин постоянного тока, Известия ТПИ, т. 160, 1966.
5. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов, «Наука», М., 1965.