

ОЦЕНКА ИСКРЕНИЯ НА КОЛЛЕКТОРЕ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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

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

В настоящее время состояние коммутации оценивается в основном по уровню искрения щеток, выраженному в баллах ГОСТ 183-66. Возможность такой оценки обусловлена тем, что интенсивность искрения определяет интенсивность разрушения коллектора и щеток. Известно, что визуальная оценка искрения субъективна, поэтому исследователями придается большое значение разработке объективных методов оценки искрения на коллекторе [1, 2, 3].

При определении количественной зависимости между технологическими отклонениями параметров магнитной системы и коллекторно-щеточного узла и состоянием коммутации машин постоянного тока возникает задача объективной оценки искрения по непрерывной шкале в целом по коллектору. При этом сигнал, выбранный для оценки искрения, должен легко измеряться на серийных машинах.

Процесс искрения имеет несколько степеней свободы: количество точек искрения на длине края щетки, интенсивность искр, цвет их и т. п. Поэтому точная оценка уровня искрения может быть лишь многомерной. Согласно кибернетической теории технологического диагноза возможность оценки и диагностики искрения определяется выбором такого диагностического сигнала, который порождается процессами, подлежащими диагнозу. При этом сигнал должен иметь размерность, не меньшую числа степеней свободы обследуемого процесса. Многомерным является сигнал, имеющий характер шума, то есть такой, когда его временная реализация имеет резко пересеченный, колебательный характер, как осциллограмма шума [4].

Лучше всего этим требованиям удовлетворяет осциллограмма импульсов напряжения на сбегающем крае щетки, измеренная по всей окружности коллектора с помощью дополнительной щеточки, установленной в плоскости сбегающего края основной щетки [2, 3]. Этот сигнал порождается процессами, протекающими под щеткой на завершающем этапе коммутации, поэтому несет объективную информацию об искрении на всех пластинах коллектора. Он используется для диагностики состояния коммутационной системы [2]: проверки состояния коллектора, выявления степени неидентичности коммутационных циклов, правильности настройки дополнительных полюсов.

Наша задача состояла в построении шкалы искрения на основе выбранных параметров сигнала. Это типичная задача классификации, которая на математическом языке формулируется как способ нахождения такой функции

$$\hat{I} = \varphi(V), \quad (1)$$

которая на всем заданном пространстве реализации I аппроксимировала бы неизвестную функцию

$$I = \psi(V) \quad (2)$$

с определенной точностью.

Здесь

I — значение искрения, полученное из опыта;

\hat{I} — значение искрения при тех же значениях параметров сигнала, полученное из аппроксимирующего уравнения;

$V = (\hat{v}_1, v_2, \dots, v_n)$ — вектор параметров v_1 диагностического сигнала.

Действительная функция (2) строится по экспериментальным данным путем разбиения множества значений векторов сигнала на q классов, когда каждому i -му классу поставлено в соответствие число I_i . Такая последовательность экспериментальных значений V , разбитая на классы, называется «обучающей последовательностью». В нашем случае при разбиении значений V на классы естественно взять за основу шкалу ГОСТ 183-66 и классам искрения 1, 1 $\frac{1}{4}$, 1 $\frac{1}{2}$, 2 поставить в соответствие числа соответственно 1; 1,25; 1,5; 2.

Отыскание аппроксимирующей функции (1) может быть осуществлено различными методами. В данном случае это было сделано методом наименьших квадратов (м. н. к.), при этом отыскание неизвестных коэффициентов аппроксимирующего полинома производится путем решения системы «нормальных» уравнений, составленных с учетом минимизации квадратичной формы.

$$\sum [\psi(V) - \varphi(V)]^2 = \min. \quad (3)$$

Выбранный сигнал, как и всякое явление природы, обладает качественной бесконечностью, однако практические потребности позволяют из бесконечного множества параметров сигнала фиксировать лишь те, которые несут наибольшую информацию об искрении и его причинах. Исследованиями Л. Л. Лавриновича и К. Биндера установлено, что наиболее существенными параметрами, описывающими осциллограмму напряжения на сбегном крае щетки, являются высота h и длительность τ импульсов напряжения на отдельных пластинах коллектора. Таким образом, осциллограмма, интерпретируемая как сложный сигнал, представляющий собой многомерную случайную функцию, может быть представлена упрощенно двумерным вероятностным законом распределения высот и длительностей импульсов напряжения. Вопрос о выборе системы параметров для описания сигнала при построении шкалы искрения не может быть решен заранее. Критерием достаточной разрешающей способности выбранной системы параметров служит достаточная адекватность описания полученной зависимостью экспериментальной «обучающей последовательности».

В настоящей работе оценка искрения построена на основе характеристик закона распределения высот импульсов, то есть на основе одномерного сечения двумерной функции распределения высот и длительности импульсов. Распределение высот импульсов несет достаточное количество информации о состоянии коммутационной системы и об искрении на коллекторе. Кроме того, длительность импульсов коррелирована с их высотой.

В качестве параметров сигнала были выбраны следующие характеристики:

1. \bar{h} — среднее значение высот всех (положительных и отрицательных) импульсов. Это значение ординаты средней линии

осциллограммы, характеризующее правильность настройки дополнительных полюсов.

2. \bar{h} — среднее значение модулей высот всех импульсов, зависящее от настройки дополнительных полюсов, состояния поверхности коллектора, контактного нажатия.
3. $\sigma_{[h]}$ — среднеквадратическое отклонение модулей высот импульсов, более всего зависящее от состояния поверхности коллектора.

Для реализации «обучающей последовательности» проведен эксперимент, в котором исследованию подвергались 30 машин серии П 1, 2 и 3 габаритов. Разные условия искрения на коллекторе получались варьированием тока подпитки дополнительных полюсов, контактного нажатия, механических условий работы щеток. В каждом опыте группой наблюдателей, состоящей из пяти человек, фиксировался визуально класс искрения в баллах и одновременно с экрана осциллографа фотографировалась осциллограмма сигнала. Для определения масштаба фотографировалась также осциллограмма эталонного синусоидального напряжения. Вычисление параметров сигнала производилось после измерения осциллограммы на ЭЦВМ «Проминь». Всего обработано 270 осциллограмм ($N=270$). «Обучающая последовательность» записывается в таблицу следующего вида:

№ опытов	Параметр и его обозначение			Класс искрения
	$\bar{h}=x_1$	$[h]=x_2$	$\sigma_{[h]}=x_3$	
1				
⋮				
N				

Аппроксимирующая функция была задана предварительно полиномом первой степени:

$$\hat{I} = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3. \quad (4)$$

По методу м. н. к. система нормальных уравнений для отыскания коэффициентов регрессии a_i имеет вид:

$$a_0 \cdot X_0 \cdot X_j + a_1 \cdot X_1 \cdot X_j + a_2 \cdot X_2 \cdot X_j + a_3 \cdot X_3 \cdot X_j = X_j \cdot I, \quad (5)$$

где $X_i \cdot X_j = \sum_k^N x_{ik} \cdot x_{jk}$ — скалярное произведение

вектор-столбцов параметров x_i и x_j таблицы экспериментальных данных.

$X_j \cdot I = \sum_k^N x_{jk} \cdot I_k$ — скалярное произведение вектор-столбцов параметра x_j и искрения I .

Решение системы приводит к следующей зависимости уровня искрения щеток от выбранных параметров сигнала:

$$\hat{I} = 0,9925 - 0,0256 \cdot \bar{h} - 0,0683 \cdot [h] + 0,158 \cdot \sigma_{[h]}. \quad (6)$$

Для проверки адекватности уравнения вычислены остаточная сумма квадратов S_R и множественный коэффициент корреляции R :

$$S_R = \sum_k^N I_k^2 - \sum_{i=0}^3 a_i \cdot \sum_{k=1}^N x_{ik} \cdot I_k = 1,0887. \quad (7)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{S_R}{\sum (I - \bar{I})^2}} = 0,992.$$

Нижний доверительный предел для R при 99 проц. доверительной вероятности $R_n = 0,986$ [5].

Так как R близок к единице, адекватность полученного уравнения высокая.

Для большей уверенности выводов о возможности оценки искрения с помощью параметров закона распределения высот импульсов была найдена еще одна зависимость, в которой в качестве параметра сигнала принята площадь S (рис. 1) под кривой $F_1(h) = 1 - F(h)$, где $F(h)$ — интегральная кривая распределения высот импульсов:

$$F(h) = P\{H < h\}. \quad (8)$$

Параметр S характеризует вероятность попадания импульсов в область $h > h_{кр}$, зависит от высоты и от длины «хвоста» функции $F_1(h)$. Высота ординат «хвоста» зависит от количества импульсов, а длина — от высоты импульсов. Поэтому параметр S должен быть объективно связан с интенсивностью искрения.

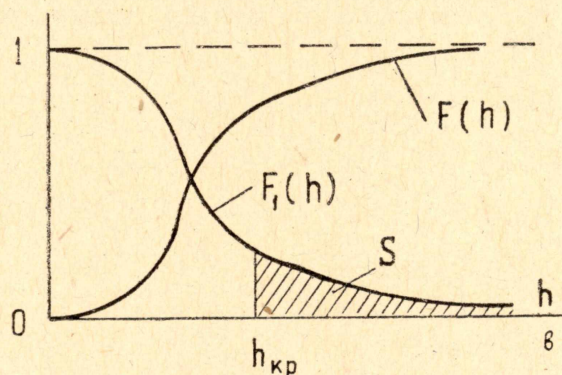


Рис. 1.

Ординаты кривой $F_1(h)$ легко определить из осциллограммы, подсчитав накопленные частоты импульсов Q_h для различных значений h . Накопленной частотой называется число импульсов, превышающих уровень h . Площадь S определяется от некоторого критического напряжения $h_{кр}$, при котором возможно появление первого видимого глазом искрения. Наблюдения показали, что для щеток ЭГ74 это напряжение равно 6в. Для проверки этого вывода были построены три «обучающие последовательности» при $h_{кр} = 2в, 4в$ и $6в$. Оказалось, что непересекающиеся оценки имеют место лишь при $h_{кр} = 6в$.

Значения функции $F_1(h)$ определялись дискретно при $h = 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 24$ и $28 в$.

Обработка эксперимента методом м. н. к. позволила получить следующую формулу:

$$\hat{I} = 1,14 + 0,00515 \cdot S. \quad (9)$$

Параметр S здесь выражается в вольтах. Множественный коэффициент корреляции, характеризующий адекватность формулы (с учетом влияния дискретности оценки искрения по шкале ГОСТ) $R = 0,998$ с нижним доверительным пределом $R_n = 0,997$ при 99 проц. доверительной вероятности.

Постоянная 1,14 в выражении (9) соответствует границе между

безыскровой коммутацией и коммутацией с искрением по непрерывной шкале.

Высокая адекватность полученных зависимостей уровня искрения от параметров сигнала свидетельствует о возможности объективной оценки искрения с помощью параметров закона распределения высот импульсов напряжения на сбегавшем крае щеток. Полученные зависимости справедливы для щеток ЭГ74. Аналогично можно найти зависимость для щеток других марок.

Хотя в опыте искрение оценивалось визуально, однако субъективность оценки сглаживалась усреднением оценок отдельных наблюдателей. Построение аппроксимирующей функции полностью устраняет субъективизм и позволяет оценивать искрение непосредственно на основе параметров сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Л. Лавринович. Искрение в скользящем контакте, Вестник электропромышленности, 1957, № 2.
2. М. Ф. Карасев. Коммутация машин постоянного тока, ГЭИ, 1955.
3. М. Ф. Карасев, В. П. Парамзин, И. В. Сенкевич. Индикатор искрения ИИ, Труды ОМИИТ, вып. 54, Омск, 1965.
4. Б. В. Павлов. Кибернетические методы технического диагноза, «Машиностроение», М., 1966.