

Плохов Игорь Владимирович — заведующий кафедрой «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, д-р техн. наук, профессор, +7 (8112) 72-40-37, ppi-esa@mail.ru.

Козырева Оксана Игоревна — инженер кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

Ильин Александр Викторович — старший преподаватель кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

Исаков Андрей Николаевич — ассистент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

Андрусич Андрей Владимирович — техник управления научно-исследовательской деятельности ФГБОУ ВПО ПсковГУ, +7 (8112) 72-40-37, ppi-esa@mail.ru.

УДК 621.313.322-81

А. М. Марков, Ю. А. Родионов

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ТОКОСЪЕМА КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Дан краткий анализ литературы, посвященной вопросу моделирования систем токосъема крупных электрических машин, определен вид математической модели системы токосъема — модель мультипликативного вида, выбраны основные параметры системы токосъема и на основе матрицы планирования эксперимента и опроса экспертов получена математическая модель, доказана ее статистическая значимость.

Ключевые слова: электрическая машина, система токосъема, искрение, токораспределение, экспертная оценка, математическое моделирование, статистическая оценка.

Известно, что система токосъема электрической машины является достаточно часто повреждаемым узлом. При этом авария в системе токосъема таких крупных машин как турбогенераторы ГРЭС, АЭС, ТЭЦ, гидрогенераторы ГЭС или двигатели и генераторы прокатных станов металлургических производств приводит к неплановой остановке машины, что влечет значительные финансовые потери.

В настоящее время состояние систем токосъема оценивается с помощью нескольких важнейших параметров, таких, например, как биение коллектора (контактного кольца), уровень искрения под щетками, равномерность токораспределения по параллельным щеткам. Научно-технические исследования систем токосъема ведутся обычно на специальных исследовательских стендах с применением аппарата математического моделирования.

Анализ литературы, посвященной данному вопросу, показывает, что для математического описания процессов, протекающих в системе токосъема, предлагаются, как правило, однофакторные, реже двухфакторные математические модели.

Так, например, в (Watson, 1961) для описания фрикционных и вольтамперных характеристик предложены зависимости, соответственно, коэффици-

ента трения от скорости скольжения и переходного падения напряжения от тока степенного вида, которые достаточно точно описывают указанные характеристики во всем диапазоне их изменения.

В (Лившиц, 1974) для тех же целей применяются математические модели линейного вида. Авторы (Морковин, 1980) исследовали зависимость износа щеток марки МГС7 от плотности тока, от окружной скорости на поверхности кольца, от температуры контакта, от величины атмосферного давления.

В работе (Энтин, 1980) получены экспериментальные зависимости износа щеток и переходного падения напряжения в контакте от температуры и от влажности окружающей среды.

Существенным недостатком вышеописанных исследований является то, что они анализируют зависимость одной из характеристик системы токосъема от одного или, в крайнем случае, от двух независимых параметров. Это делает невозможным использование полученных моделей для комплексной оценки состояния системы токосъема, находящейся в эксплуатации.

В данной статье рассмотрены вопросы разработки математической модели системы токосъема, позволяющей комплексно оценить ее состояние. При этом используются параметры, которые можно измерить с помощью специальных диагностических приборов.

Для того, чтобы оценить состояние системы токосъема электрической машины необходимо описать это состояние в виде некоторого уравнения, называемого уравнением регрессии:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

где X_1, X_2, \dots, X_n — входные переменные, Y — функция отклика.

Под входными переменными будем понимать величины, измеряемые диагностическими приборами, а функция отклика будет представлять собой интегральную оценку состояния системы токосъема.

При выборе вида уравнения регрессии необходимо, в конечном счете, руководствоваться требованиями простоты его и адекватности. Если изучаемое явление не отличается сложностью, то для его описания применяются обычно уравнения первого порядка. Под адекватностью уравнения в данном случае понимается его способность оценивать состояние системы токосъема в некоторой области с заданной точностью. Если первоначально выбранная линейная модель окажется неадекватной, то следует перейти к уравнению более высокого порядка.

Основными параметрами, которые определяют состояние системы токосъема любой электрической машины в соответствии с инструкциями по эксплуатации (РАО «ЕЭС России», 1998) и которые могут быть измерены с помощью диагностических приборов, являются:

- состояние контактной поверхности коллектора (контактного кольца), выражающее в мкм уровень биения, волнистость, эксцентриситет,
- равномерность токораспределения в системе параллельно работающих щеток,
- уровень искрения в системе токосъема.

Состояние системы токосъема электрической машины будем оценивать с помощью метода экспертных оценок.

Ввиду того, что зависимость состояния системы токосъема от вышеперечисленных параметров является нелинейной (Забоин, 1995), то наиболее правильным будет применение математических моделей мультипликативного вида, т. е. вида

$$Y = a_0 \times X_1^{a_1} \times X_2^{a_2} \times \dots \times X_n^{a_n},$$

где a_i — неизвестные коэффициенты.

Мультипликативные модели по сравнению с моделями других видов обладают большей наглядностью и простотой. Т. к. состояние системы токосъема необходимо оценивать по трем параметрам, то уравнение модели можно записать в виде

$$Y = a_0 \times B^{a_1} \times T^{a_2} \times I^{a_n},$$

где B — биение контактной поверхности; T — степень равномерности токораспределения в системе параллельно работающих щеток; I — уровень искрения в системе токосъема.

Все входные параметры должны быть выражены в относительных единицах.

Так как оценка состояния системы токосъема производится методом экспертных оценок, то необходимо было предварительно выбрать экспертов в области эксплуатации систем токосъема. Такими экспертами стали 15 ведущих специалистов электростанций и энергосистем России — АО «Оренбургэнерго», «Пермэнерго», «Тюменьэнерго», «Нижновэнерго», Черепетская ГРЭС, Нижневартовская ГРЭС, Сургутская ГРЭС.

Для получения математической модели необходимо построить план эксперимента. Он может быть записан в виде таблицы, называемой обычно матрицей планирования или репликой. Значения факторов записываются в матрицу не в натуральном, а в безразмерном виде.

Будем считать, что факторы B , T , I варьируются на пяти уровнях, условно обозначенных цифрами 1, 2, 3, 4 и 5. Состояние системы токосъема будем оценивать тоже по пятибалльной шкале следующим образом:

- 5 — система токосъема работает отлично,
- 4 — система токосъема работает хорошо,
- 3 — система токосъема работает удовлетворительно,
- 2 — система токосъема работает неудовлетворительно,
- 1 — нештатная ситуация в системе токосъема.

Очевидно, что в данном случае полный факторный эксперимент требует проведения 125 опытов. Сократить число опытов позволяет так называемый дробный факторный эксперимент, число опытов которого меньше числа всех возможных сочетаний уровней плана, но который сохраняет свойства полного факторного эксперимента.

В табл. 1 приведена матрица планирования для трехфакторного пятиуровневого эксперимента (Львовский, 1988).

Таблица 1

Матрица планирования для трехфакторного пятиуровневого эксперимента

Номер опыта	Уровни факторов		
	Б	Т	И
1	1	1	5
2	1	2	4
3	1	3	3
4	2	4	2
5	2	5	1
6	2	1	4
7	3	2	3
8	3	3	2
9	3	4	1
10	4	5	5
11	4	1	3
12	4	2	2
13	5	3	1
14	5	4	5
15	5	5	4

В качестве уровней трех выбранных выше факторов примем следующие значения.

По биению:

- 5 — уровень биения не превышает 50 мкм,
- 4 — уровень биения 50–100 мкм,
- 3 — уровень биения 100–200 мкм,
- 2 — уровень биения 200–400 мкм,
- 1 — уровень биения превышает 400 мкм.

По токораспределению:

- 5 — среднее отклонение токов не превышает 25%,
- 4 — среднее отклонение токов 25–50%,
- 3 — среднее отклонение токов 50–100%,
- 2 — среднее отклонение токов 100–200%,
- 1 — среднее отклонение более 200%.

По уровню искрения:

- 5 — степень искрения равна 1 (по ГОСТ 183–74),
- 4 — степень искрения равна 1,25,
- 3 — степень искрения равна 1,5,
- 2 — степень искрения равна 2,
- 1 — степень искрения равна 3.

Среднее отклонение токов Т щеток было определено по формуле (Аврух, 1974):

$$T = \frac{1}{I_{cp}} \times \sqrt{\frac{\sum (I_i - I_{cp})^2}{(N - 1)}} \times 100\%,$$

где I_i — ток i -й щетки, А; I_{cp} — средний ток, А; N — количество щеток.

$$I = \frac{I_{\text{ротора}}}{N}$$

Результаты опроса экспертов, проведенного в соответствии с матрицей планирования, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты опроса экспертов

Эксперт	Факторы			Экспертная оценка состояния системы токосъема
	Б	Г	И	
1. Бычков И. Г., начальник электротехнической службы АО «Оренбургэнерго»	1	1	5	2
	2	4	4	3
	3	2	3	3
2. Редкоп А. П., инженер электротехнической службы АО «Оренбургэнерго»	1	3	3	2
	4	5	5	5
	5	3	1	2
3. Шураков В. П., начальник электротехнической службы АО «Пермэнерго»	1	3	3	2
	3	2	3	3
	4	1	3	3
4. Шмакова В. С., инженер электротехнической службы АО «Пермэнерго»	1	1	5	2
	3	3	2	3
	5	5	4	4
5. Токнов Н. В., начальник электроцеха АО «Черепетская ГРЭС»	2	4	2	2
	2	5	1	2
	4	5	5	5
6. Бахтин С. И., начальник электроцеха Тюменской ТЭЦ-2	3	3	2	2
	4	1	3	2
	5	5	4	5
7. Рамазанов Р. Х., заместитель начальника электроцеха Тюменской ТЭЦ-2	2	5	1	2
	2	1	4	2
	4	2	2	2
8. Ляшонков А. С., заместитель начальника электроцеха Нижневартовской ГРЭС	3	3	2	2
	4	5	5	5
	1	2	4	2
9. Смоленцев В. Н., заместитель электротехнической службы АО «Омскэнергоналадка»	4	2	2	2
	3	2	3	3
	2	5	1	1
10. Жарков С. В., начальник электроцеха Самарской ТЭЦ	1	2	4	2
	3	4	1	2
	5	4	5	5
11. Агеев В. Г., инженер электротехнической службы АО «Пермэнерго»	1	2	4	2
	3	2	1	2
	5	4	5	4
12. Журавлев С. В., начальник электроцеха Сургутской ГРЭС	1	1	5	2
	2	1	4	2
	5	5	4	5
13. Липский Р. П., начальник электроремонтного цеха Сургутской ГРЭС	1	3	3	3
	4	2	2	2
	5	3	1	1

Эксперт	Факторы			Экспертная оценка состояния системы токосъема
	Б	Т	И	
14. Иванов В. М., начальник электротехнической службы АО «Нижновэнерго»	5	3	1	2
	3	4	1	1
	4	5	5	5
15. Мараев А. М., заместитель начальника электротехнической службы АО «Нижновэнерго»	2	4	2	2
	2	1	4	3
	4	1	3	3

Далее необходимо было определить численные значения коэффициентов в уравнении регрессии. Это может быть сделано любым из известных методов, например, методом, основанном на сингулярном разложении матриц «SVD» (Форсайт, 1980).

Затем необходимо проверить значимость уравнения регрессии в целом. Это можно осуществить с помощью критерия Фишера F , который в данном случае представляет собой отношение общей дисперсии результатов экспериментов S и остаточной дисперсии $S_{\text{ост}}$:

$$F = \frac{S}{S_{\text{ост}}},$$

$$S = \frac{\sum y^2 - \frac{1}{n}(\sum y)^2}{n - 1},$$

$$S_{\text{ост}} = \frac{\sum (y - y_{\text{рег}})^2}{n - k - 1},$$

где y — значение функции отклика в эксперименте (т. е. полученное в ходе опроса экспертов), $y_{\text{рег}}$ — значение функции отклика, полученное из уравнения регрессии, n — количество опытов, k — число факторов.

Из последнего равенства следует, что остаточная дисперсия $S_{\text{ост}}$ представляет собой показатель ошибки предсказания уравнением регрессии результатов опыта. Следовательно, критерий Фишера показывает, во сколько раз уравнение регрессии предсказывает результаты опытов лучше, чем среднее значение функции отклика.

Расчитанное значение критерия Фишера сравнивают с его табличным значением и если расчетное выше табличного, то связь между функцией отклика и Факторами является статистически значимой.

Опрос экспертов проводился в соответствии с матрицей планирования. Каждый из 15 экспертов дал свое заключение о состоянии системы токосъема по трем возможным сочетаниям факторов.

Интегральная оценка состояния системы токосъема была получена на основании опроса экспертов и имеет вид:

$$Y = \begin{matrix} 0,26 & 0,33 & 0,41 \\ B \times T \times I \end{matrix}$$

Статистическая оценка полученной математической модели выполнялась на основании методики, изложенной в (Львовский, 1988). Результаты расчетов сведены в табл. 2, по данным которой можно рассчитать значение критерия Фишера F и сравнить его с табличным F_T , взятым из (Львовский, 1988). Получим

$$F = 3,67; \quad F_T = 2,84.$$

Таблица 2

Статистическая оценка качества
математической модели состояния системы токосъема

Номер опыта	У	У _{перг.}
1	1	1
2	2	2,01
3	3	3
4	4	4
5	5	5
6	1,67	1,93
7	2	2,22
8	2,33	2,25
9	2,33	2,52
10	1,67	2,04
11	2,33	2,12
12	3	2,63
13	2,33	2,54
14	1,67	2,10
15	5	4,72
16	2,67	2,25
17	2	2,40
18	1,67	2,18
19	4,67	4,65
20	4,67	4,56

Т. к. $F > F_T$, то можно сделать вывод, что полученная математическая модель является статистически значимой и может быть использована при практических оценках состояния систем токосъема турбогенераторов в реальных условиях.

Литература

1. Watson A. F. Factors influencing brush stability // Proc. of the First Carbon Brush Conference. 1961.

2. Лившиц П. С. Скользящий контакт электрических машин. М. : Энергия, 1974.
3. Морковин В. Д., Давидович Я. Г. Моделирование процессов изнашивания щеток марки МГС 7 // Электротехническая промышленность. Электротехнические материалы. 1980. № 4.
4. Энтин М. А., Бороха И. К. Влияние температуры окружающей среды на износ электрощеток // Электротехническая промышленность. Электротехнические материалы. 1980. № 9.
5. Российское акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России». Типовая инструкция по эксплуатации и ремонту узла контактных колец и щеточного аппарата турбогенераторов мощностью 63 МВт и выше. РД 153–34.0–45.510.98.
6. Забоин В. Н. Новый метод расчета твердощеточных систем токосъема энергетических электрических машин // Тезисы докладов Российской научно-технической конференции «Инновационные наукоемкие технологии для России». СПб., 1995.
7. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М. : Высшая школа, 1988.
8. Аврух В. Ю., Зайчиков В. Г., Шелепов В. А. Устройство и эксплуатация щеточных узлов современных турбогенераторов и турбовозбудителей. М. : Энергия, 1974.
9. Форсайт Дж., Малькольм М. Машинные методы математических вычислений. М. : Мир, 1980.

A. M. Markov, Y. A. Rodionov

THE METHOD OF ASSESSMENT OF LARGE ELECTRICAL MACHINE CURRENT COLLECTION

The article provides a brief analysis of the literature on the subject of modeling systems current collection of large electrical machines, defined type of mathematical model of current collection system — a model of multiplicative type, the basic parameters of selected current collection system and based on a matrix of experimental design and survey expert mathematical model, proved its statistical significance.

Keywords: electrical machine, system of current collection, frankly, heartbeat, current distribution, peer review, mathematical modeling, statistical evaluation.

Марков Александр Михайлович — доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, канд. техн. наук, доцент, +7 (8112) 72-40-37, ekotexekotex@mail.ru.

Родионов Юрий Александрович — доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, канд. техн. наук, доцент.