УДК 621.313

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЩЕТОЧНОГО УЗЛА

Радионов С.Е. – студент группы МАмз-241,
магистрант кафедры эксплуатации автомобилей
Кудреватых А.В. – к.т.н., доцент кафедры эксплуатация автомобилей
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Россия, г. Кемерово

От надежности узлов локомотива напрямую зависит непрерывности процесса перевозки. Частью тяговой системы серийных тепловозов является тяговый генератор, который имеет определенный заданный ресурс. Работа тяговых синхронных генераторов тепловозов сопряжена с воздействием различных факторов, как внутренних, так и внешних. Одним из таких факторов является наличие щеточного узла, критически влияющего на надежность и срок службы тягового генератора.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана математическая модель прогнозирования остаточного ресурса щеточного узла тягового генератора, учитывающая особенности его эксплуатации и техническое состояние щеточного узла, а также включающая исходные данные о конструкции и режиме работы агрегата.

В качестве исходных данных предлагается использовать конструктивные и номинальные параметры генератора, данные микропроцессорной системы управления и диагностики, а также экспериментальные результаты по износу электрощеток.

Предлагаемая методика определения остаточного ресурса щеточного узла тягового генератора состоит из следующих пунктов:

1) Ввод конструктивных и номинальных параметров оборудования

2) Сбор бортовой системой мониторинга массивов данных о показателях режимов работы тягового генератора и их обработка;

3) Проведение экспериментальных исследований по износу электрических щеток с варьированием воздействующих на износ факторов в

диапазонах, определяемых из анализа данных, собранных бортовой системой мониторинга в п.2 данной методики;

4) Математическое моделирование процесса износа электрических щеток, в результате которого рассчитывается текущий износ и прогнозируемый остаточный ресурс электрощеток.

Интенсивность износа щетки по высоте в зависимости от силы нажатия

на щетку F, частоты вращения контактного кольца n и силы тока, проходящего через графитовую щетку, мм/ч [1, 2]:

Выражение для расчета интенсивности износа электрощеток тягового генератора получено нижеприведенным путем.

$$\frac{\Delta И}{t} = k \cdot n \cdot F\left(W_0 + W_1 I^{\alpha}\right), \quad (1)$$

где α – показатель степени силы тока электрической щетки.

k – постоянный коэффициент:

$$k = \frac{\pi \cdot D_к}{60 S_щ}. \quad (2)$$

Коэффициенты модели W0 и W1 увеличиваются при возрастании частоты вращения контактных колец [1]. Для моделирования влияния частоты вращения контактного кольца используем следующие нелинейные возрастающие функции:

$$W_0(n) = k_1 + k_2 n^{d1}; \quad (3)$$

$$W_1(n) = k_3 + k_4 n^{d2}, \quad (4)$$

где k1 … k4 – коэффициенты модели; d1 и d2 – показатели степеней.

После подстановки выражений (3) и (4) в уравнение (1) получаем математическое выражение, с использованием которого можно рассчитать интенсивность износа щетки синхронного генератора с учетом силы нажатия на счету, частоты вращения контактного кольца и силы тока, проходящего через исследуемую графитовую щетку, мм/ч:

$$\frac{\Delta И}{t}(F, n, I) = kF\left(k_1 n + k_2 n^{d1+1} + k_3 n I^{\alpha} + k_4 n^{d2+1} I^{\alpha}\right). \quad (5)$$

Математическая модель для определения интенсивности износа щетки синхронного генератора с входными величинами в относительных единицах, мм/ч:

$$\frac{\Delta И}{t}(F_*, n_*, I_*) = kF_*\left(k_1 n_* + k_2 n_*^{d1+1} + k_3 n_* I_*^{\alpha} + k_4 n_*^{d2+1} I_*^{\alpha}\right). \quad (6)$$

Выражение для расчета интенсивности износа электрощеток тягового генератора, мм/ч:

$$\frac{\Delta И}{t}(F, n, I) = k \frac{F}{F_{ном}}\left(k_1 \frac{n}{n_{ном}} + k_2 \frac{n^{d1+1}}{n_{ном}^{d1+1}} + k_3 \frac{n I^{\alpha}}{n_{ном} I_{ном}^{\alpha}} + k_4 \frac{n^{d2+1} I^{\alpha}}{n_{ном}^{d2+1} I_{ном}^{\alpha}}\right). \quad (7)$$

Математическая модель определения остаточного ресурса щеточного узла тягового генератора требует в качестве входных данных методики, конструктивные и номинальные параметры оборудования тепловоза.

Необходимы следующие параметры: диаметр контактных колец тягового генератора, количество щеток на кольце тягового генератора, линейные размеры щетки: ширина; длина, площадь контактной поверхности щетки, сила нажатия рычага щеткодержателя на щетку, высота новой щетки, критическая высота щетки, остаточная высота щетки на последнем ТО (равна высоте новой щетки, если после установки ее остаточная высота не измерялась).

Необходимые для моделирования изнашивания щеток данные, собираемые бортовой системой мониторинга карьерного самосвала в виде массивов чисел: текущего времени выполненного измерения, частоты вращения вала дизеля и тягового генератора, тока возбуждения тягового генератора, скорости движения.

По данным мониторинга необходимо определить распределение значения тока возбуждения тягового генератора, при этом учесть распределение тока по параллельно работающим щеткам. Определяется минимальное, среднее и максимальное значения тока. Вычисляется плотность тока для соответствующих значений тока, с учетом площади сечения щетки. Пример такого распределения приведен на рисунке 1.

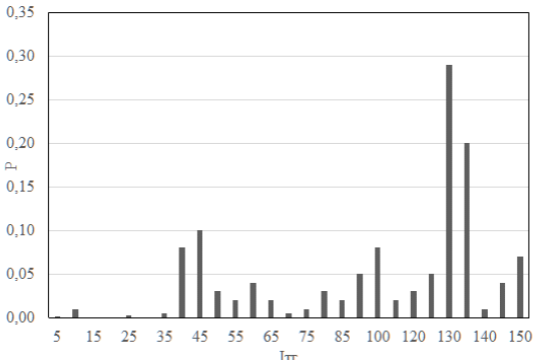

Рисунок 1 – Распределение плотности вероятности тока возбуждения тягового генератора

Также вычисляется частота вращения ротора тягового генератора, приводимого в движение дизельным двигателем. Определяется минимальное, среднее и максимальное значение частоты вращения. Вычисляется частота вращения экспериментальной установки для соответствующих значений частоты вращения ротора тягового двигателя, с учетом разницы диаметров контактных колец, для задания линейной скорости, соответствующей линейной скорости на тяговом генераторе. Пример такого распределения приведен на рисунке 2. Соответствующие значения линейной скорости поверхности колец (одинаковые для тягового генератора и экспериментальной установки):

$$V_{\text{ТГ}} = n_{\text{ТГ}} \cdot D_{\text{экс}} \cdot \frac{\pi}{30} \tag{8}$$

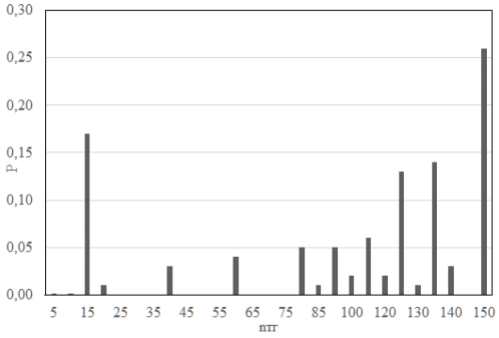

Рисунок 2 – Распределение плотности вероятности частоты вращения вала дизеля и тягового генератора

С целью определения параметров математической модели необходимо выполнить экспериментальные исследования. Для каждого типа электрических щеток необходимо проводить экспериментальные исследования с целью определения интенсивности износа щеток в зависимости от различных факторов. При проведении исследований по определению износа электрических щеток необходимо провести притирку щеток:

Притирка щеток осуществляется в два этапа.

На первом этапе выполняется механическая обработка контактных колец и очищение их поверхности от наработанной ранее политуры с применением шлифовального камня. Для этого с колец убираются все щетки, установленные в щеткодержателях. Далее при низкой частоте вращения производится очистка поверхности колец от политуры путем плавной шлифовки с помощью «камня».

Второй этап включает в себя подгонку щеток. Ее проводят с помощью шлифовальной бумаги. Для этого щетки устанавливаются на место в щеткодержатель, под них подкладывается специальная шлифовальная бумага, ее рабочая поверхность должна быть обращена к щеткам. После этого вал поворачивается вручную до того момента, когда бумага станет соприкасаться со всей поверхностью щеток и шлифовать ее. Далее для более тщательной пришлифовки щеток кольца разгоняются до среднего значения частоты вращения и работают так 30 ч, в течение которого допускается дополнительная механическая обработка тела щетки с применением мелкозернистой шлифовальной бумаги. При этом на кольцах необходимо наработать политуру, для образования которой необходимо 2-3 часа.

Для определения износа щеток необходимо провести полно факторный

эксперимент с различными значения частоты вращения и тока возбуждения.

Для проведения экспериментальных исследований необходимо применение центрального ротатабельного планирования второго порядка [2], рисунок 3.

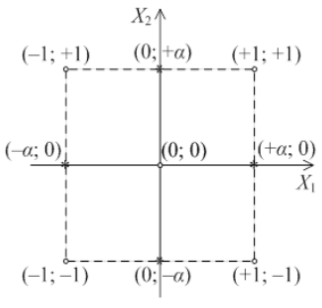

Рисунок 3 – План эксперимента типа 2 со «звездными» точками

Исследуются 2 фактора значение силы тока и частоты вращения контактных колец, сила нажатия на щетку в процессе эксплуатации остаётся постоянной, поэтому она в качестве фактора не рассматривается.

Определение неизвестных коэффициентов математической модели выполнено на основании результатов экспериментальных исследований интенсивности износа щетки.

Необходимо определить коэффициенты модели, при которых отклонения значений интенсивности износа, рассчитанных по выражению и полученных экспериментально при одинаковых входных данных, будут минимальные:

$$f(k_1,k_2,k_3,k_4,\alpha,d_1,d_2)=\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\Delta И}{t}(F_*,n_*,I_*)-Y_{\text{эксп}.i}\right)^2\to\min, \tag{9}$$

где N – количество экспериментов;

Yэксп.i – значение интенсивности износа щетки, полученное в результате *i* -го эксперимента, мм/ч.

В результате математических преобразований получаем коэффициенты математической модели износа щеток синхронного генератора:

$$k_4(\alpha,d_1,d_2)=\frac{\frac{U(\alpha,d_1,d_2)-C(\alpha,d_1,d_2)}{S(\alpha,d_1,d_2)-A(\alpha,d_1,d_2)}-\frac{M(\alpha,d_1,d_2)-C(\alpha,d_1,d_2)}{K(\alpha,d_1,d_2)-A(\alpha,d_1,d_2)}}{\frac{T(\alpha,d_1,d_2)-B(\alpha,d_1,d_2)}{S(\alpha,d_1,d_2)-A(\alpha,d_1,d_2)}-\frac{L(\alpha,d_1,d_2)-B(\alpha,d_1,d_2)}{K(\alpha,d_1,d_2)-A(\alpha,d_1,d_2)}}; \tag{10}$$

$$k_3(\alpha,d_1,d_2)=\frac{U(\alpha,d_1,d_2)-C(\alpha,d_1,d_2)}{S(\alpha,d_1,d_2)-A(\alpha,d_1,d_2)}-\frac{T(\alpha,d_1,d_2)-B(\alpha,d_1,d_2)}{S(\alpha,d_1,d_2)-A(\alpha,d_1,d_2)}k_4(\alpha,d_1,d_2);$$

$$k_2(\alpha,d_1,d_2)=C(\alpha,d_1,d_2)-A(\alpha,d_1,d_2)k_3(\alpha,d_1,d_2)-B(\alpha,d_1,d_2)k_4(\alpha,d_1,d_2); \tag{11}$$

$$k_3(\alpha,d_1,d_2)=\frac{U(\alpha,d_1,d_2)-C(\alpha,d_1,d_2)}{S(\alpha,d_1,d_2)-A(\alpha,d_1,d_2)}-\frac{T(\alpha,d_1,d_2)-B(\alpha,d_1,d_2)}{S(\alpha,d_1,d_2)-A(\alpha,d_1,d_2)}k_4(\alpha,d_1,d_2); \tag{12}$$

$$k_1(\alpha,d_1,d_2)=\frac{b_1}{a_{11}}-\frac{a_{12}(d_1)}{a_{11}}k_2(\alpha,d_1,d_2)-\frac{a_{13}(\alpha)}{a_{11}}k_3(\alpha,d_1,d_2)-\frac{a_{14}(\alpha,d_2)}{a_{11}}k_4(\alpha,d_1,d_2). \tag{13}$$

Показатели степеней d1, d2 задаются в диапазоне [0,8; 1,2] с шагом 0,05, показатель степени α – [0,4; 0,6] с шагом 0,05.

Используя полученную математическую модель можно оценить ресурс времени работы щетки.

Средняя интенсивность износа, мм/ч:

$$\left(\frac{\Delta И}{t}\right)_{\text{ср}}=\frac{1}{N_{\text{и}}}\sum_{q=1}^{N_{\text{и}}}\left(\frac{\Delta И}{t}\right)_q, \tag{14}$$

где Nи – количество измерений в массиве данных времени.

Расчётный износ, мм:

$$\Delta И=\frac{T}{3600}\left(\frac{\Delta И}{t}\right)_{\text{ср}},\left(\frac{\Delta И}{t}\right)_{\text{ср}}=\frac{1}{N_{\text{и}}}\sum_{q=1}^{N_{\text{и}}}\left(\frac{\Delta И}{t}\right)_q, \tag{15}$$

где T – время записи данных измерений системой мониторинга, с.

Текущая (оставшаяся) высота щетки, мм:

$$h_{\text{щ.ост}} = h_{\text{щ}} - \Delta\text{И}, \left(\frac{\Delta\text{И}}{t}\right)_{\text{ср}} = \frac{1}{N_{\text{и}}}\sum_{q=1}^{N_{\text{и}}}\left(\frac{\Delta\text{И}}{t}\right)_q, \quad (16)$$

где hщ – высота новой щетки синхронного генератора, мм.

Текущая (оставшаяся) рабочая высота щетки, мм:

$$h_{\text{щ.ост.раб}} = h_{\text{щ.ост}} - h_{\text{щ.кр}}, \quad (17)$$

где hщ.кр – минимально допустимая (критическая) высота щетки генератора, мм.

Текущий остаточный ресурс времени работы щетки, ч:

$$T_{\text{ост}} = \frac{h_{\text{щ.ост.раб}}}{(\Delta\text{И}/t)_{\text{ср}}}. \quad (18)$$

Пробег локомотива, соответствующий текущему остаточному ресурсу щетки (при заданной средней скорости движения тепловоза), тыс. км:

$$Prob_{\text{ост}} = \frac{v_{\text{ср}} T_{\text{ост}}}{1000}, \quad (19)$$

С учетом данных, полученных от бортовой системы мониторинга показателей режимов работы локомотива, ресурс времени работы новой щетки составляет, ч:

$$T_{\text{нов}} = \frac{h_{\text{щ}} - h_{\text{щ.кр}}}{(\Delta\text{И}/t)_{\text{ср}}}. \quad (20)$$

Рассчитанный ресурс щетка будет иметь при сохранении средних показателей режимов работы.

Представленная методика позволяет определить остаточный ресурс щеточного узла тягового генератора с учетом особенностей эксплуатации и технического состояния щеточного узла. Ее внедрение в системы мониторинга карьерных самосвалов способствует снижению затрат на ремонт и повышению надежности техники. Перспективы работы связаны с интеграцией искусственного интеллекта для автоматизации анализа данных.

Список литературы:

1. Хольм, Р. Электрические контакты / Хольм Р. – Москва: Издательство иностранной литературы, 1961. – 464с.

2. Забоин, В. Н. Научно–методологические основы расчета и проектирования систем токосъема электрических машин: автореф. дис. соиск. учен. степ. докт. техн. наук: 05.09.01 / Валерий Николаевич Забоин; Санкт – Петербургский технический университет. – Санкт–Петербург, 2004. – 32 с.

3. Байсадыков, М. Ф. Разработка метода оценки интенсивности изнашивания и алгоритма прогнозирования остаточного ресурса щеток тяговых электродвигателей: автореф. дис. соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.09.01/

Марсель Фаритович Байсадыков. – Омск, 2020. – 20 с.

4. Иванов А.А., Петров Б.С. Исследование износа щеток электрических машин. – М.: Энергия, 2018.