



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЩЕТОЧНОГО УЗЛА СИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Статья посвящена формированию математической модели процесса изнашивания и оценке остаточного ресурса щеток синхронного тягового генератора. Предлагается учитывать особенности эксплуатации и технического состояния щеточного узла при расчете остаточного ресурса электрических щеток. Проведен анализ массивов данных, собираемых бортовой системой мониторинга, и выявлены необходимые параметры для определения остаточного ресурса электрических щеток. Составлена математическая модель интенсивности износа электрических щеток тягового генератора. Приведен план экспериментального исследования для определения коэффициентов математической модели. Представлена схема экспериментальной установки для определения остаточного ресурса щеток синхронного генератора. Получены зависимости величины остаточного ресурса от изменения параметров рабочих режимов.

**Ключевые слова:** износ, методика, математическая модель, электрическая щетка, щеточный узел, остаточный ресурс, полнофакторный эксперимент.

Синхронный тяговый генератор является частью тягового электрического привода тепловоза и имеет определенный срок службы. В процессе эксплуатации на узлы тягового генератора тепловоза воздействуют различные внутренние и внешние факторы. Одним из таких узлов является щеточный узел.

В статье для разработки методики определения остаточного ресурса щеточного узла тягового генератора ГТСН-2800 предлагается использовать в качестве исходных данных конструктивные и номинальные параметры тягового генератора, данные локомотивной системы мониторинга и диагностики, результаты экспериментальных исследований по износу электрических щеток.

Принципиальный подход к прогнозированию износа электрощеток, взаимодействующих с контактными кольцами, основан на теоретических положениях, приведенных в [1] и принятых большинством исследователей в данной области [1–5].

Интенсивность износа щетки в основном зависит от силы  $F$ , прижимающей щетку, скорости вращения контактного кольца  $n$  и тока  $I$ , протекающего через графитовую щетку [1, 6]:

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

где  $\alpha$  — показатель степени силы тока электрической щетки;  $W_0$  и  $W_1$  — весовые коэффициенты

составляющих износа;  $k$  — постоянный коэффициент:

$$k = \frac{\pi \cdot D_k}{60 S_{щ}}. \quad (2)$$

Процесс изнашивания электрических щеток на контактных кольцах синхронного генератора похож на процесс изнашивания на коллекторе электрических машин постоянного тока, однако имеет свои особенности, влияющие на прогнозирование остаточного ресурса. Износ электрощеток на коллекторных машинах постоянного тока разделяют на фрикционную, электрокоррозионную и электроэрозионную составляющие [7–9].

Интенсивность искрения щеток в таких машинах в значительной степени зависит от настройки магнитной системы и в первую очередь — дополнительных полюсов. При моделировании износа электрощеток на кольцах синхронных машин электроэрозионную составляющую не выделяют как независимую, а объединяют с электрокоррозионной. Так как в щеточном узле синхронных машин отсутствует коммутация — процесс переключения секций якорной обмотки, — искрение в нем однозначно является функцией показателей режимов работы щеточного узла (плотности тока в щетке, частоты вращения кольца и нажатия на щетку).

Величина нажатия пружины на щеткодержатель составляет: при изготовлении нового синхронного генератора  $17,7 \pm 1,95$  Н ( $1,8 \pm 0,2$  кгс); в эксплуатации — не менее 13,7 Н (1,4 кгс).

Назначенный ресурс тягового синхронного генератора ГТСН-2800 при работе локомотивов до капитального ремонта с полной заменой изоляции составляет 2400 тыс. км. Средний срок службы щеток ЭГ4 до замены по износу — 300 тыс. км.

Для формирования математической модели изнашивания щеток и оценки остаточного ресурса щеточного узла синхронного тягового генератора следует выполнить следующие действия:

1) ввести конструктивные и номинальные параметры синхронного генератора;

2) провести анализ массивов данных, собранных бортовой системой мониторинга и содержащих сведения о параметрах режимов работы синхронного тягового генератора в эксплуатации, а также последующую обработку;

3) выполнить эксперименты по износу электрических щеток с учетом различных факторов, влияющих на износ, и их вариаций в диапазонах, которые были получены при помощи бортовой системы мониторинга (пункт 2);

4) выполнить расчет (на основе математической модели) процесса изнашивания электрических щеток и, учитывая результаты математического моделирования, произвести расчет износа и остаточного ресурса электрощеток на текущий момент времени.

В качестве входных данных для определения остаточного ресурса щеточного узла необходимы следующие конструктивные и номинальные параметры синхронного тягового генератора: критическая высота щетки, площадь контактной поверхности щетки, высота новой щетки, остаточная высота щетки на последнем техническом обслуживании, линейные размеры щетки (ширина, длина), сила нажатия рычага щеткодержателя на щетку, количество щеток на кольце тягового генератора, диаметр контактных колец тягового генератора.

Система мониторинга локомотива регистрирует различные показатели электрических машин. Необходимые для моделирования износа щеток данные собираются системой мониторинга локомотива и включают в себя ряд значений: время измерения, скорость локомотива, ток возбуждения тягового генератора, частоту вращения валов дизеля и тягового генератора.

Для формирования функции отклика процесса изнашивания электрических щеток в синхронных

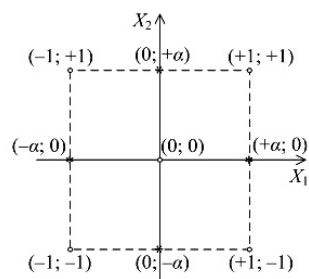


Рис. 1. План эксперимента типа  $2^2$  со «звездными» точками

машинах с контактными кольцами целесообразно провести экспериментальные исследования и получить уравнение регрессии. Для вычисления коэффициентов регрессии необходимо сформировать план эксперимента.

Ввиду относительно низкой интенсивности износа электрощеток на контактных кольцах синхронного генератора (по сравнению со щетками тяговых коллекторных электродвигателей) и необходимости увеличения времени испытаний, целесообразно минимизировать количество испытаний для определения коэффициентов математической модели с использованием методов планирования эксперимента.

Так как диапазон допустимых значений нажатия щеток в эксплуатации невелик (1,6–2,0 кгс), а изменение силы нажатия в процессе работы щетки не происходит, можно считать варьируемыми факторами только силу тока в щетках и скорость вращения контактных колец. Следовательно, число вариативных факторов в эксперименте равно двум ( $k = 2$ ).

Верхний уровень переменного фактора для удобства регистрации условий эксперимента и обработки экспериментальных данных запишем как +1, нижний уровень внесем как -1, а основной уровень — 0. Мы также предлагаем следующие обозначения: переменный коэффициент (плотность тока щетки) —  $X_1$ ; коэффициент (линейная скорость контактной поверхности кольца) —  $X_2$ ; величина износа щетки —  $Y$ .

При выполнении полного факторного эксперимента к основным точкам плана  $2^2$  и к опытам с параметрами факторов (+1; +1), (+1; -1), (-1; +1), (-1; -1) добавляют некоторое число  $n_0$  опытов в центре плана и четыре «звездные» точки. Добавление опытов необходимо для качественной оцен-

Таблица 1

Содержание плана эксперимента

Содержание плана	Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$Y$
План типа $2^2$	1	+1	+1	$Y_1$
	2	-1	+1	$Y_2$
	3	+1	-1	$Y_3$
	4	-1	-1	$Y_4$
«Звездные» точки	5	$+\alpha = +1$	0	$Y_5$
	6	$-\alpha = -1$	0	$Y_6$
	7	0	$+\alpha = +1$	$Y_7$
	8	0	$-\alpha = -1$	$Y_8$
Нулевая точка	9	0	0	$Y_9$

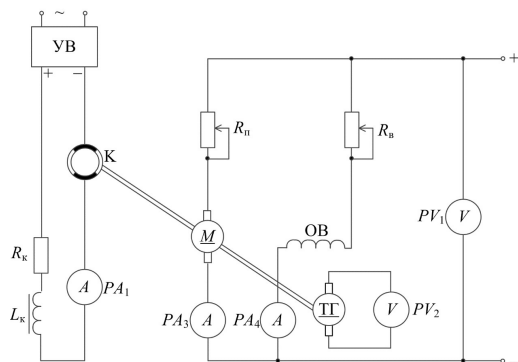


Рис. 2. Схема экспериментального исследования

ки коэффициентов математической модели при  $k = 2$ . У добавленных опытов плечо обозначается  $\alpha$ , а координаты будут  $(+\alpha; 0)$ ,  $(-\alpha; 0)$ ,  $(0; +\alpha)$ ,  $(0; -\alpha)$ . При ортогональном плане второго порядка значения «звездного» плеча принимают равным  $\alpha = 1$  (рис. 1) [10].

Содержание плана эксперимента, включающего значения переменных факторов ( $X_1, X_2$ ) и измерения износа ( $Y_1, Y_2$ ) в зависимости от результатов эксперимента, следует обобщить в таблице содержания эксперимента (табл. 1).

Схема экспериментальной установки представлена на схеме экспериментального исследования (рис. 2). Вращение контактных колец экспериментальной установки осуществляется двигателем постоянного тока М. Время измерения каждой точки составляет 120 часов. Измерения проводились с помощью микрометра в трех точках щетки: в середине щетки; в середине рабочей кромки набегающего края; в середине рабочей кромки сбегающего края. Для регулирования силы тока через щетки применялся управляемый выпрямитель (УВ). Частота вращения контактных колец измерялась при помощи тахогенератора (ТГ), установленного на двигателе постоянного тока.

Для получения математической модели необходимо преобразовать уравнение (1). Известно, что коэффициенты модели  $W_0$  и  $W_1$  увеличиваются при возрастании частоты вращения контактных колец [1].

Учет изменения интенсивности износа, обусловленного частотой вращения кольца, происходит при помощи нелинейных возрастающих функций:

$$W_0(n) = k_1 + k_2 n^{d_1}, \quad (3)$$

$$W_1(n) = k_3 + k_4 n^{d_2}. \quad (4)$$

где  $k_1 \dots k_4$  — коэффициенты модели;  $d_1$  и  $d_2$  — показатели степеней.

Для того чтобы получить математическое выражение по определению интенсивности износа щетки синхронного генератора с учетом параметров рабочих режимов, преобразуем уравнение (1) путем подстановки в него уравнений (3) и (4):

$$\frac{\Delta I}{t}(F, n, I) = kF(k_1 n + k_2 n^{d_1+1} + k_3 n I^\alpha + k_4 n^{d_2+1} I^\alpha). \quad (5)$$

Математическая модель (5) с параметрами рабочих режимов в относительных единицах:

$$\frac{\Delta I}{t}(F, n, I) = kF(k_1 n + k_2 n^{d_1+1} + k_3 n I^\alpha + k_4 n^{d_2+1} I^\alpha). \quad (6)$$

Значения уровня интенсивности тока щетки и линейной скорости поверхности кольца в эксперименте были рассчитаны на основе анализа данных, записанных бортовой системой мониторинга. Для определения диапазона варьирования тока, протекающего через щетку, выбираются максимальное и минимальное значения тока возбуждения через щетку. Плотность тока рассчитывается с учетом площади поперечного сечения щетки, сохраняя эксплуатационную плотность.

Щетки не изнашиваются, когда вал дизельного двигателя и тягового генератора неподвижны. Следовательно, данные системы мониторинга, записанные при отключенном дизеле, можно исключить из расчетов, чтобы сократить вычислительные ресурсы, необходимые для моделирования процесса износа щеток. Для определения диапазона частоты вращения ротора синхронного тягового генератора, приводимого в движение дизельным двигателем, выбирается максимальная и минимальная частота вращения ротора. Линейная скорость контактной поверхности кольца в эксперименте устанавливается в соответствии эксплуатации.

Необходимо определить коэффициенты модели (6), при которых отклонения значений интенсивности износа, рассчитанных по выражению и полученных экспериментально с теми же входными данными, будет минимальным среднеквадратичным отклонением:

$$f(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\Delta I}{t}(F, n, I) - Y_{\text{экс},i} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $N$  — количество экспериментов;  $Y_{\text{экс},i}$  — значение интенсивности износа щетки, полученное в результате  $i$ -го эксперимента, мм/ч.

Целевую функцию (7) можно записать следующим образом:

$$f(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2) = \sum_{i=1}^N \left( kF \left( \frac{k_1 n + k_2 n^{d_1+1} + k_3 n I^\alpha + k_4 n^{d_2+1} I^\alpha}{+ k_3 n I^\alpha + k_4 n^{d_2+1} I^\alpha} \right) - Y_{\text{экс},i} \right)^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Определяем точки экстремума по каждому из коэффициентов для определения  $k_1, k_2, k_3, k_4$ :

$$\frac{df(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2)}{dk_1} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{df(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2)}{dk_2} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{df(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2)}{dk_3} = 0; \quad (11)$$

$$\frac{df(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2)}{dk_4} = 0. \quad (12)$$

В результате получается система уравнений

$$\begin{aligned}
& k_1 F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^2 + k_2 F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+2} + k_3 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^2 + k_4 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+2} = F_* \sum_{i=1}^N n_i Y_i; \\
& k_1 F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+2} + k_2 F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{2-d_2+2} + k_3 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+2} + k_4 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+1} n_i^{d_2+1} = F_* \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+1} Y_i; \\
& k_1 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^2 + k_2 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+2} + k_3 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^2 + k_4 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{d_2+2} = F_* \sum_{i=1}^N I_i^a n_i Y_i; \\
& k_1 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+2} + k_2 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+1} n_i^{d_2+1} + k_3 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{d_2+2} + k_4 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{2d_2+2} = F_* \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+1} Y_i.
\end{aligned} \quad (13)$$

Систему уравнений (13) можно записать в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^2 & F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^2 & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+2} \\ F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{2-d_2+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+1} n_i^{d_2+1} \\ F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^2 & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^2 & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{d_2+2} \\ F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+1} n_i^{d_2+1} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{d_2+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{2d_2+2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_* \sum_{i=1}^N n_i Y_i \\ F_* \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+1} Y_i \\ F_* \sum_{i=1}^N I_i^a n_i Y_i \\ F_* \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+1} Y_i \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Для заданных постоянных значений показателей степени  $\alpha$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ , которые позволяют учитывать нелинейность величины интенсивности износа щетки от входных величин, система уравнений (14) будет линейной, что способствует определению коэффициентов модели  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  в результате решения системы линейных алгебраических уравнений при разных постоянных значениях показателей степени  $\alpha$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ . Данные показатели определяются методом прямого поиска. При вычислениях минимального значения целевой функции (8) приняты следующие диапазоны варьирования показателей степени  $\alpha = [0,40; 0,45 \dots 0,60]$ ,  $d_1 = [0,80; 0,85 \dots 1,20]$ ,  $d_2 = [0,80; 0,85 \dots 1,20]$ , диапазоны определены методом прямого экспертного анализа.

В результате многократного решения задачи с различными показателями степени найдены значения, при которых целевая функция для заданных экспериментальных данных принимает минимальное значение:  $\alpha = 0,55$ ;  $d_1 = 1,00$ ;  $d_2 = 0,95$ , а коэффициенты регрессии  $k_1$  ( $\alpha$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ) = 1,034;  $k_2$  ( $\alpha$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ) = 0,115;  $k_3$  ( $\alpha$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ) = 0,392;  $k_4$  ( $\alpha$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ) = 0,0031.

С учетом полученных значений коэффициентов преобразуем математическую модель (6) для определения интенсивности износа щетки синхронного генератора:

$$\begin{aligned}
& \frac{\Delta I}{t}(F, n, I) = \\
& = F(1,511n + 168 \cdot 10^{-6} n^2 + 31,51 \cdot 10^{-3} n I^{0,55}) 10^{-6}. \quad (15)
\end{aligned}$$

Применяя математическую модель (15), построены зависимости остаточного ресурса при изменении силы нажатия на щетку (рис. 3) и при изменении силы тока через щетку (рис. 4). Производим расчет остаточного ресурса щетки.

Средняя интенсивность износа, мм/ч:

$$\left( \frac{\Delta I}{t} \right)_{\text{cp}} = \frac{1}{N_u} \sum_{q=1}^{N_u} \left( \frac{\Delta I}{t} \right)_q, \quad (16)$$

где  $N_u$  — количество измерений в массиве данных времени.

Расчётный износ, мм:

$$\Delta I = \frac{T}{3600} \left( \frac{\Delta I}{t} \right)_{\text{cp}}, \quad \left( \frac{\Delta I}{t} \right)_{\text{cp}} = \frac{1}{N_u} \sum_{q=1}^{N_u} \left( \frac{\Delta I}{t} \right)_q, \quad (17)$$

где  $T$  — время записи данных измерений системой мониторинга, с.

Текущая (оставшаяся) высота щетки, мм:

$$h_{\text{ост}} = h_{\text{щ}} - \Delta I, \quad \left( \frac{\Delta I}{t} \right)_{\text{cp}} = \frac{1}{N_u} \sum_{q=1}^{N_u} \left( \frac{\Delta I}{t} \right)_q, \quad (18)$$

где  $h_{\text{щ}}$  — высота новой щетки синхронного генератора, мм.

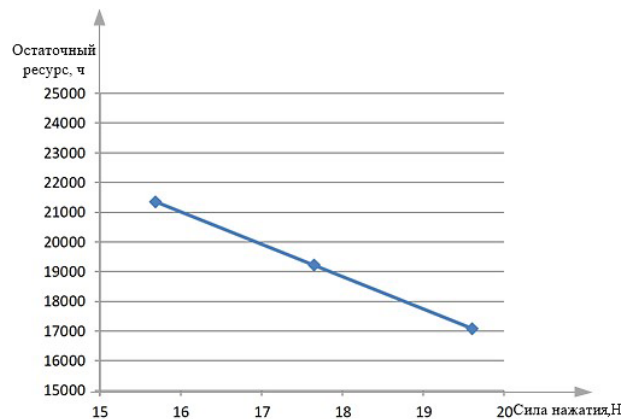


Рис. 3. Изменение остаточного ресурса при изменении силы нажатия

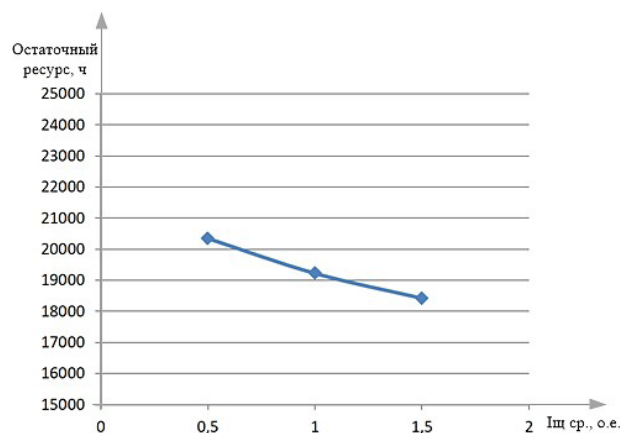


Рис. 4. Изменение остаточного ресурса при изменении силы тока через щетку

Текущая (оставшаяся) рабочая высота щетки, мм:

$$h_{\text{щ.ост.раб}} = h_{\text{щ.ост}} - h_{\text{щ.кр}}, \quad (19)$$

где  $h_{\text{щ.кр}}$  — минимально допустимая (критическая) высота щетки генератора, мм.

Текущий остаточный ресурс времени работы щетки, ч:

$$T_{\text{ост}} = \frac{h_{\text{щ.ост.раб}}}{(\Delta h/t)_{\text{ср}}}. \quad (20)$$

Учитывая массив данных, записанный бортовой системой мониторинга параметров рабочих режимов синхронного тягового генератора, остаточный ресурс новой щетки составляет, ч:

$$T_{\text{нов}} = \frac{h_{\text{щ}} - h_{\text{щ.кр}}}{(\Delta h/t)_{\text{ср}}}. \quad (21)$$

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

Таким образом, приведенное исследование позволяет рассчитать остаточный ресурс щеточного узла, учитывая особенности конструкции и параметры рабочих режимов. Математическая модель износа, полученная на основании классических уравнений износа, позволяет учитывать не только изменение факторов, влияющих на износ, но и нелинейность этого изменения благодаря весовым коэффициентам. Полученная математическая модель позволяет оценить текущий износ щетки и остаточный ресурс щеточного узла при изменении его рабочих режимов с помощью информации бортовой системы мониторинга и данных с последнего ТО.

#### Список источников

1. Плохов И. В., Ильин А. В., Козырева О. И. Структура и алгоритмы имитационного моделирования динамики электрофрикционного взаимодействия // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономические и технические науки. 2014. № 4. С. 192 – 199. EDN: SISXIT.
2. Изотов А. И., Фоминых А. А., Никулин С. В. [и др.]. Повышение долговечности работы щеточно-контактного аппарата турбогенератора за счет использования смазывающих щеток, выполненных на основе дисульфида молибдена // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 3. С. 31 – 37. EDN: ZTSRMX.
3. Изотов А. И., Беспалов В. Я., Фоминых А. А., Мамаев Г. А. Способ повышения ресурса и стабильности работы щеточно-контактного аппарата турбогенератора // Электричество. 2016. № 8. С. 63 – 67. EDN: WIEKGJ.
4. Качин О. С. Повышение ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2008. 21 с.
5. Качин О. С., Качин С. И. Увеличение ресурса скользящего контакта электрических машин: моногр. LAMBERT Academic Publishing, 2012. 165 с.

6. Забоин В. Н. Научно-методологические основы расчета и проектирования систем токосъема электрических машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2004. 32 с.

7. Байсадыков М. Ф. Разработка метода оценки интенсивности изнашивания и алгоритма прогнозирования остаточного ресурса щеток тяговых электродвигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2020. 20 с.

8. Харламов В. В., Попов Д. И., Байсадыков М. Ф. Разработка способа прогнозирования остаточного ресурса электрощеток тяговых электродвигателей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 7. С. 182 – 190. DOI: 10.18799/24131830/2021/7/3282. EDN: CBJWL.

9. Пат. 2757784 Российская Федерация, МПК H01R 39/58. Способ определения остаточного ресурса электрощеток тягового электродвигателя. Харламов В. В., Попов Д. И. № 2021103446; заявл. 11.02.2021; опубл. 21.10.2021. Бюл. № 30.

10. Бойко А. Ф., Воронкова М. Н. Теория планирования многофакторных экспериментов: учебное пособие. Белгород: Изд-во Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. 75 с. EDN: RTDZDP.

**МАКАРОВ Артем Сергеевич**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск  
SPIN-код: 9485-1606  
AuthorID (РИНЦ): 1149772

Адрес для переписки: martyom1597@gmail.com  
**ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.  
SPIN-код: 5093-8463  
AuthorID (РИНЦ): 465264  
ORCID: 0000-0003-3621-3377  
AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: emoe@omgps.ru  
**ПОПОВ Денис Игоревич**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.  
SPIN-код: 8506-9250  
AuthorID (РИНЦ): 657177  
ORCID: 0000-0001-9519-1062  
AuthorID (SCOPUS): 57200090858  
Адрес для переписки: emoe@omgps.ru

#### Для цитирования

Макаров А. С., Харламов В. В., Попов Д. И. Моделирование процесса изнашивания и оценка остаточного ресурса щеточного узла синхронного тягового генератора // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 84 – 90. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-84-90. EDN: PGKJJD.

Статья поступила в редакцию 12.07.2024 г.  
© А. С. Макаров, В. В. Харламов, Д. И. Попов



## METHODOLOGY DEVELOPMENT FOR ESTIMATING THE RESIDUAL RESOURCE OF DIESEL LOCOMOTIVE TRACTION GENERATOR BRUSHES

The article presents the formation of a mathematical model of the wear process and estimation of the residual resource of synchronous traction generator brushes. The authors propose to consider the peculiarities of operation and technical condition of the brush assembly in calculating the residual resource of electric brushes. The data arrays collected by the on-board monitoring system are analysed and required parameters for determining the residual resource of electric brushes are identified. The article provides a mathematical model of wear intensity of the traction generator electric brushes. The authors present the experimental research plan for determining the mathematical model coefficients. There is a scheme of experimental installation for determining the residual resource of synchronous generator brushes. The authors obtain dependences of the residual resource value on the change of operating modes.

**Keywords:** wear, methodology, mathematical model, electric brush, brush assembly, residual resource, full-factor experiment.

### References

1. Plokhov I. V., Il'in A. V., Kozyreva O. I. Struktura i algoritmy imitatsionnogo modelirovaniya dinamiki elektrofriksionnogo vzaimodeystviya [Structure and algorithmic steps simulation of the dynamics electro friction engagement]. Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomicheskiye i tekhnicheskiye nauki. *Bulletin of Pskov State University. Series: Economic and Technical Sciences*. 2014. No. 4. P. 192–199. EDN: SISXIT. (In Russ.).
2. Izotov A. I., Fominykh A. A., Nikulin S. V. [et al.]. Povysheniye dolgovechnosti raboty shchetochno-kontaktnogo apparata turbogeneratora za schet ispol'zovaniya smazyvayushchikh shchetok, vypolnennykh na osnove disul'fida molibdena [Increase of the operation durability of the turbogenerator brush-contact apparatus due to the use of lubricating brushes made on the basis of molybdenum disulfide]. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2017. Vol. 5, no. 3. P. 31–37. EDN: ZTSRMX. (In Russ.).
3. Izotov A. I., Bespalov V. Ya., Fominykh A. A., Mamayev G. A. Sposob povysheniya resursa i stabil'nosti raboty shchetochno-kontaktnogo apparata turbogeneratora [Method for increasing the service life and achieving more stable operation of the turbine generator brush-and-contact gear]. Elektrichestvo. *Electricity*. 2016. No. 8. P. 63–67. EDN: WIEKGJ. (In Russ.).
4. Kachin O. S. Povysheniye resursa skol'zyashchego kontakta universal'nykh kollektornykh elektrodvigateley [Increase of the sliding contact resource of the universal collector electric motors]. Tomsk, 2008. 21 p. (In Russ.).
5. Kachin O. S., Kachin S. I. Uvelicheniye resursa skol'zyashchego kontakta elektricheskikh mashin [Increasing the resource of the sliding contact of electrical machines]. LAMBERT Academic Publishing, 2012. 165 p. (In Russ.).
6. Zaboin V. N. Nauchno-metodologicheskiye osnovy rascheta i proyektirovaniya sistem tokos'yema elektricheskikh mashin [Scientific and methodological bases of calculation and design of current collector systems of electric machines]. Saint Petersburg, 2004. 32 p. (In Russ.).
7. Baysadykov M. F. Razrabotka metoda otsenki intensivnosti iznashivaniya i algoritma prognozirovaniya ostatochnogo resursa shchetok tyagovykh elektrodvigateley [Development of a method for estimation of wear intensity and algorithm for prediction of residual life of brushes of traction electric motors]. Omsk, 2020. 20 p. (In Russ.).
8. Kharlamov V. V., Popov D. I., Baysadykov M. F. Razrabotka sposoba prognozirovaniya ostatochnogo resursa elektroschetok tyagovykh elektrodvigateley [Development of a method for predicting the residual life of electric traction motor brushes]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. *Inzhiniring georesursov. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021. Vol. 332, no. 7. P. 182–190. DOI: 10.18799/24131830/2021/7/3282. EDN: CBJIWL. (In Russ.).
9. Patent 2757784 Russian Federation, IPC H01R 39/58. Sposob opredeleniya ostatochnogo resursa elektroschetok tyagovogo elektrodvigateleya [Method for determining the residual life of the traction electric motor electric brushes] / Kharlamov V. V., Popov D. I. No. 2021103446. (In Russ.).
10. Boyko A. F., Voronkova M. N. Teoriya planirovaniya mnogofaktornykh eksperimentov: uchebnoye posobiye [Theory of planning multifactor experiments]. Belgorod, 2020. 75 p. (In Russ.).

**MAKAROV Artem Sergeevich**, Graduate Student of the Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 9485-1606

AuthorID (RSCI): 1149772

Correspondence address: martyom1597@gmail.com

**KHARLAMOV Viktor Vasilyevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 5093-8463

AuthorID (RSCI): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Correspondence address: emoe@omgups.ru

**POPOV Denis Igorevich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Electrical Machines

and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 8506-9250

AuthorID (RSCI): 657177

ORCID: 0000-0001-9519-1062

AuthorID (SCOPUS): 57200090858

Correspondence address: popovomsk@yandex.ru

#### For citations

Makarov A. S., Kharlamov V. V., Popov D. I. Methodology development for estimating the residual resource of diesel locomotive traction generator brushes. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 84–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-84-90. EDN: PGKJJD.

**Received July 27, 2024.**

© **A. S. Makarov, V. V. Kharlamov,  
D. I. Popov**