

Д.Н. Соловьёв<sup>1</sup>, А.А. Лаврухин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ДАННЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОВОЗА

**Анотация.** В данной статье представлен подход к оценке остаточного ресурса изоляции обмоток тягового электродвигателя с учетом измерений токов якоря и возбуждения электровозов во время движения, на основе модели теплового износа. Предметом исследования является оценка остаточного ресурса изоляции тягового электродвигателя с учетом измерений бортовых систем электровоза. Показана целесообразность определения остаточного ресурса изоляции ТЭД по времени на основе аппроксимации экспоненциальной функций ресурса от температуры. Выполнен тепловой расчет обмоток ТЭД при изменении токов. Получена аналитическая зависимость изменения ресурса изоляции обмоток ТЭД от токовых нагрузок с накоплением по времени. Оценка остаточного ресурса изоляции позволяет уточнить сроки проведения технического обслуживания и текущего ремонта ТЭД с учетом интенсивности эксплуатационных факторов.

**Ключевые слова:** ресурс, тяговый электродвигатель, изоляция, тепловой износ, тепловая модель.

D.N. Solovyov<sup>1</sup>, A.A. Lavrukhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

## DETERMINATION OF THE RESIDUAL LIFE OF THE INSULATION OF THE TRACTION ELECTRIC MOTOR, CONSIDERING THE DATA OF THE ON-BOARD SYSTEMS OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVE

**Abstract.** This article presents an approach to assessing the residual life of the insulation of the windings of a traction motor, taking into account measurements of armature currents and excitation of electric locomotives during movement, based on a thermal wear model. The subject of the study is the evaluation of the residual life of the insulation of the traction motor, taking into account the measurements of the on-board systems of the electric locomotive. The expediency of determining the residual resource of TEM insulation in time based on the approximation of the exponential functions of the resource on temperature is shown. The thermal calculation of the TED windings with a change in currents has been performed. An analytical dependence of the change in the insulation resource of the TED windings on current loads with accumulation over time is obtained. Estimation of the remaining insulation life allows you to clarify the timing of maintenance and current repairs of TED, taking into account the intensity of operational factors.

**Keywords:** resource, traction motor, insulation, thermal wear, thermal model.

### Введение

Наряду с началом широкого применения в настоящее время методов дистанционного диагностирования тягового подвижного состава (ТПС) в России и за рубежом [1-5], прогнозирование ресурса тяговых электродвигателей (ТЭД) является актуальной задачей в транспортном электромашиностроении, решение которой позволяет определить срок восстановления ТЭД в зависимости от условий эксплуатации [6-8]. Ресурс ТЭД количественно определяется совокупностью вероятностных характеристик и параметров, отражающих закономерности возникновения отказов в конкретных условиях эксплуатации. Возможность решения задачи прогнозирования ресурса ТЭД обуславливается тем обстоятельством, что в большинстве случаев их отказы являются следствием постепенного накапливания повреждений, постепенного старения и изнашивания. Понятие [9] «внезапный отказ» относительно, т.к. скачкообразному изменению параметров технических устройств предшествует постепенное изменение каких-либо физических величин, о которых отсутствует информация.

Ряд авторов в своих работах [10,11] указывают на зависимость процесса снижения прочности электрической изоляции под воздействием тепловых процессов как первостепенную. Анализ данных по отказам ТЭД показал, что наибольшее негативное влияние на прочность изоляции обмоток оказывает тепловое старение в процессе эксплуатации. В работах [12,13] авторы

указывают, что многие физико-химические процессы, связанные с возникновением отказов витковой изоляции, являются термически активируемыми процессами, т.е. интенсивность протекания процессов увеличивается с повышением температуры.

Так же, по оценке [14,15] на интенсивность старения изоляции ТЭД влияют следующие основные факторы:

- 1) значение и время действия рабочих температур;
- 2) пределы и частота изменения температур;
- 3) влажность;
- 4) электрическое напряжение;
- 5) воздействие химических элементов;
- 6) вибрационные нагрузки.

В данном исследовании будем учитывать только температурный фактор, как основной.

Для решения задачи прогнозирования ресурса необходимо создание математической модели, которая описывает закономерности изменения свойств материалов основных узлов тягового электродвигателя [16,17].

В связи с этим система прогнозирования ресурса тягового электродвигателя представляется как совокупность вычислительно программных средств, в числе которых важное место занимает тепловая математическая модель, позволяющая определить температуру всех частей тягового электродвигателя, и модель, описывающая закономерность изменения свойств изоляции от температуры [18, 19].

Целью данного исследования является получение аналитической зависимости изменения ресурса изоляции обмоток ТЭД от токовых нагрузок с накоплением по данным бортовых измерительных систем электровоза серии 2ЭС6 в реальном времени. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи: на основании правил тяговых расчетов и тепловых кривых модели ТЭД требуется получить графики зависимости ресурса изоляции обмоток ТЭД от температуры, а также выполнить расчет остаточного ресурса изоляции обмоток ТЭД на основе данных бортовых систем локомотива.

В ТЭД 810-й серии не установлены датчики температуры [20], поэтому оценка температуры элементов двигателя будет выполняться на основе теплового расчета в продолжительном режиме. Наиболее распространенные методы расчета нагревания ТЭД основаны на теории нагревания однородного твердого тела.

При применении любых методов теплового расчета первоочередной задачей является определение потерь всех видов в ТЭД, как источников тепловых потоков, в широком диапазоне изменения токов и напряжений.

Тепловой расчет ТЭД на основе эквивалентных тепловых схем замещения можно рассматривать как приближенный для решения трехмерных задач. Он основан на аналогии тепловых и электрических сопротивлений. Для составления тепловой схемы замещения всю тепловую систему машины с непрерывно распределенными тепловыми источниками и тепловыми параметрами заменяют эквивалентной электрической схемой (сеткой), составленной из внутренних сопротивлений между узловыми точками и поверхностных сопротивлений. Точность теплового расчета определяется не только количеством узловых точек, но в большей степени зависит от точности определения коэффициентов теплоотдачи с поверхностями нагрева, теплопроводности выбранных материалов и других факторов, вносящих неопределенность в исходные данные.

Применение тепловых схем замещения дает возможность определять средние температуры частей электрической машины, принимаемых за однородные тела, однако требует получение значительного объема исходных данных от производителя ТЭД, что в эксплуатации не всегда представляется возможным. Более того, погрешность в задании исходных данных приводит к низкой точности полученных результатов данного метода.

Для определения установившегося перегрева при постоянном тепловом потоке в данном случае предлагается использовать следующий подход.

Так, выражение для определения превышения температуры (перегрева) обмотки якоря над

температурой окружающей среды запишется в виде:

$$\tau_{\text{як}} = \frac{0,91 \cdot (P_{\text{як}} \cdot A + P_{\text{магн}} \cdot B)}{C} ; \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{як}}$  – установившийся перегрев обмотки якоря над температурой окружающей среды;  $P_{\text{як}}$  – электрические потери в обмотке якоря,  $P_{\text{магн}}$  – магнитные потери в обмотке якоря; 0,91 – коэффициент, учитывающий открытое исполнение лобовых частей обмотки якоря; А,В,С - коэффициенты аппроксимации.

Выражение для определения превышения температуры (перегрева) обмотки главных полюсов над температурой окружающей среды запишется в виде:

$$\tau_{\text{зн}} = \frac{I_g^2 \cdot (A \cdot B \cdot C)}{D} ; \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{зн}}$  – установившийся перегрев обмотки главных полюсов над температурой окружающей среды;  $I_g$  – значение тока возбуждения; А,В,С, D - коэффициенты аппроксимации.

Выражение для определения превышения температуры (перегрева) обмотки дополнительных полюсов над температурой окружающей среды запишется в виде:

$$\tau_{\text{д.п.}} = \frac{I_{\text{як}}^2 \cdot t_r \cdot (A \cdot B \cdot C)}{D}, \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{д.п.}}$  – установившийся перегрев обмотки дополнительных полюсов над температурой окружающей среды;  $t_r$  – коэффициент, увеличения сопротивления катушки при ожидаемой температуре; А,В,С, D - коэффициенты аппроксимации.

Выражение для определения превышения температуры (перегрева) компенсационной обмотки над температурой окружающей среды запишется в виде:

$$\tau_{\text{к.о}} = \frac{1,7 \cdot (P_{\text{к.о}} \cdot A + B)}{C} ; \quad (4)$$

где  $\tau_{\text{к.о}}$  – установившийся перегрев компенсационной обмотки над температурой окружающей среды;  $P_{\text{к.о}}$  – электрические потери в компенсационной обмотке; А,В,С - коэффициенты аппроксимации.

Указанные выше коэффициенты аппроксимации подбираются исходя из условий, при которых ток ТЭД равен номинальному значению тока ТЭД для данного класса изоляции.

При остывании изменение перегрева во времени описывается следующей зависимостью:

$$\tau = \tau_{\infty} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (5)$$

Перегрев обмоток ТЭД с учетом изменений токов  $I'$ :

$$\tau'_{\infty} = \tau_{\infty} \left(\frac{I'}{I}\right)^2. \quad (6)$$

Практическая реализация указанных формул к изменяющемуся току якоря и возбуждения ТЭД состоит в следующей последовательности действий:

1) По измеренным текущим значениям токов якоря и возбуждения с учетом режимов работы мотор-вентиляторов (объема охлаждающего воздуха и его температуры) определяются установившиеся превышения температуры элементов ТЭД (по формуле (3)).

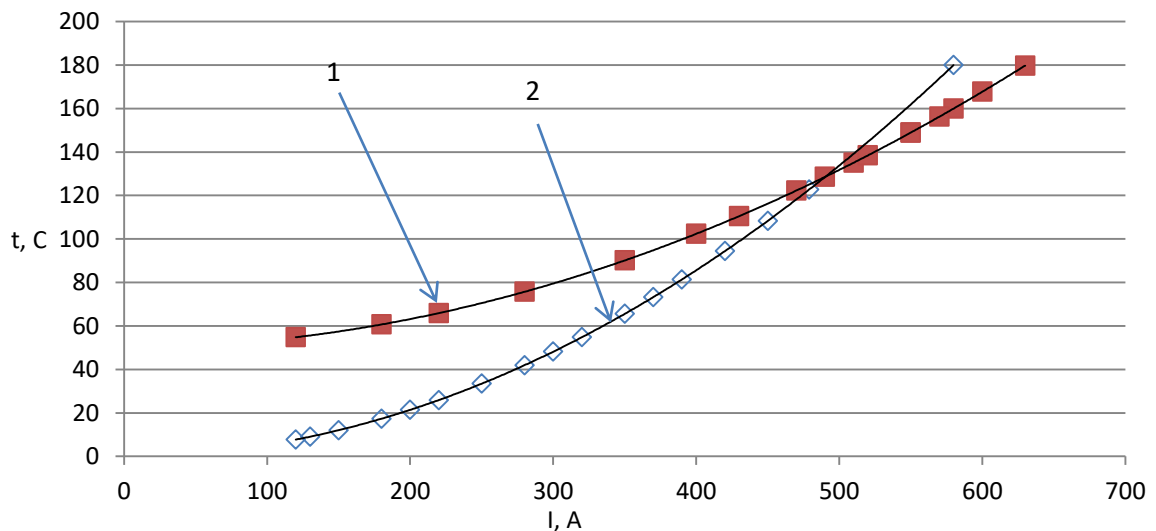
2) Расчетное установившиеся превышение температуры элементов ТЭД сравнивается с предыдущим (на временном отрезке) и определяется либо режим нагрева (если текущее значение больше предыдущего), либо охлаждения.

3) Рассчитывается по кривой нагрева / охлаждения (формулы (1-5)) новое значение установившегося превышения температуры элементов ТЭД по заданному времени  $t$  и далее.

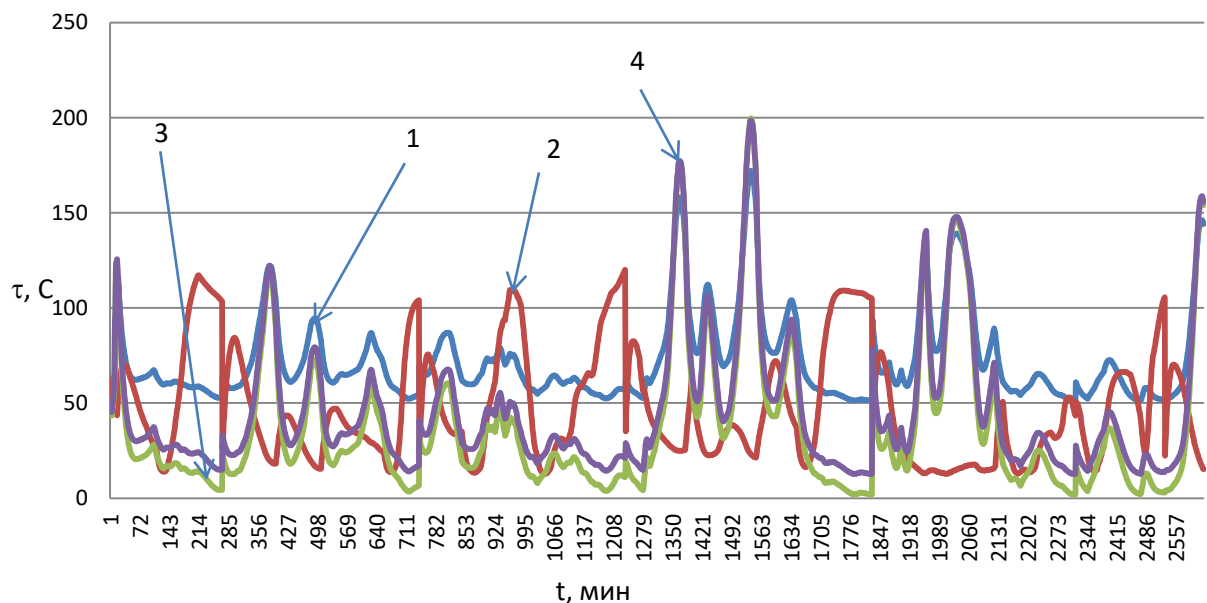
Таким образом, строятся кривые нагрева и охлаждения ТЭД для обмотки якоря, возбуждения, дополнительного полюса, компенсационной обмотки («тепловые характеристики»), представляющие собой зависимость установившихся превышений температуры обмоток от значения тока, т.е.  $\tau'_{\infty} = f(I)$  при определенном количестве охлаждающего воздуха. На рис. 1 представлена полученная тепловая характеристика для обмотки якоря и обмотки возбуждения ТЭД серии 2ЭС6.

Аналогично получены тепловые характеристики для других обмоток ТЭД. Полученные установившиеся превышения температур указанных обмоток на основе выражений (1- 6) по времени с учетом изменения соответствующих токов по реальным данным электровоза представлены на рис. 2.

Остаточный ресурс изоляции ТЭД по времени может быть визуализирован на основе аппроксимации экспоненциальной функций ресурса от температуры.



**Рис. 1. Тепловая характеристика для обмотки якоря и обмотки возбуждения**  
1 – обмотка якоря; 2 – обмотка возбуждения



**Рис. 2. Установившиеся превышения температур указанных обмоток по времени с учетом изменения соответствующих токов**  
1 – обмотка якоря; 2 – обмотка возбуждения; 3 – обмотка дополнительных полюсов; 4 – компенсационная обмотка

Основные зависимости старения изоляционных конструкций ТЭД от времени (пробега) описываются, в основном в зависимости от приложенного напряжения и температуры. Математическая зависимость ресурса изоляции  $L$  (в часах) от температуры  $\tau$  может быть представлена [21]:

$$L = Ae^{B/\tau} ; \quad (7)$$

где  $A$ ,  $B$  – коэффициенты.

Согласно исследованиям [21] для изоляции класса нагревостойкости Н зависимость ресурса изоляции  $L$  (в часах) от температуры может быть представлена, как на рис. 3.

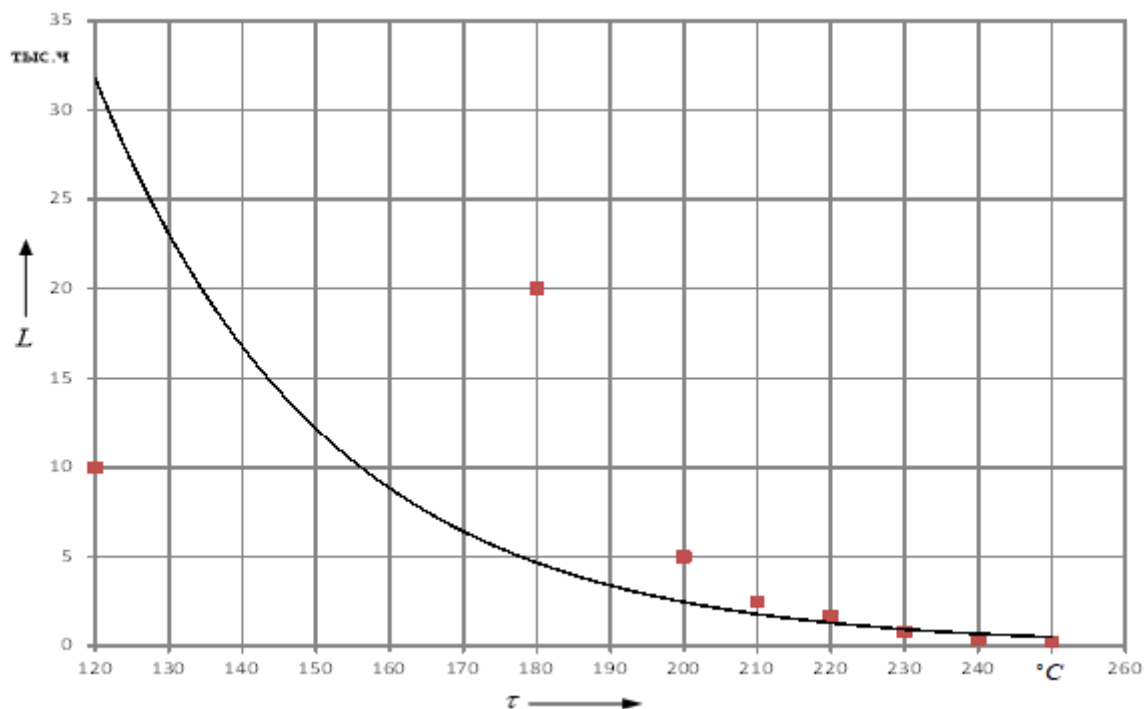


Рис. 3. Зависимость ресурса изоляции  $L$  (в часах) от температуры

Представленная на рис.3 зависимость может быть аппроксимирована по выражению (7) со следующими коэффициентами  $A = 0,05$ ;  $B = 800$ .

Остаточный ресурс изоляции обмоток ТЭД под действием теплового фактора при изменении температуры (рис. 2) предлагается представить в виде, тыс.ч:

$$L = L_0 - \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \left( \frac{\exp(800 / \tau_i)}{\exp(800 / \tau_H)} \right), \quad (8)$$

где  $\tau_H$  – температура обмотки при номинальном токе, соответствующая номинальному установившемуся перегреву для заданного класса нагревостойкости изоляции, °C;  $n$  – количество интервалов дискретизации по времени;  $\Delta t_i$  – шаг по времени, ч;  $L_0$  – начальный ресурс, ч.

Смысл выражения (8) заключается в следующем. При номинальном перегреве обмоток  $\tau_H$  износ будет равен фактическому астрономическому времени работы ТЭД. При перегреве обмоток ниже номинального износ по времени будет меньше астрономического исходя из соотношений по рис.3.

На основе представленных соображений получены зависимости остаточного ресурса изоляции обмоток якоря и возбуждения ТЭД по времени (2600 ч) на основе изменения токов (и соответственно превышения температур – рис. 2), зарегистрированных с бортовых измерительных систем электровозов серии 2ЭС6 (рис. 4 – 5).

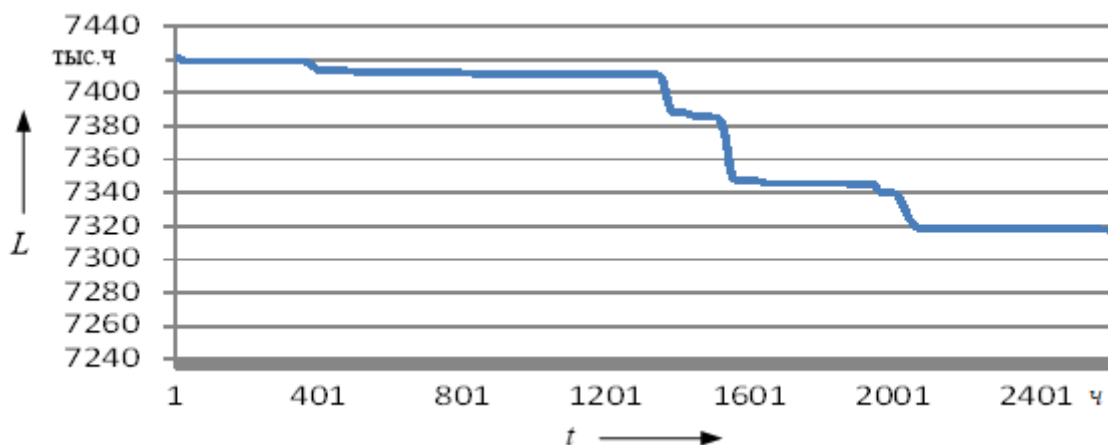


Рис. 4. Остаточный ресурс изоляции обмотки якоря ТЭД

$$(L_0 = 7420 \text{ ч}; \sum_{i=1}^n \Delta t_i = 2600 \text{ ч})$$

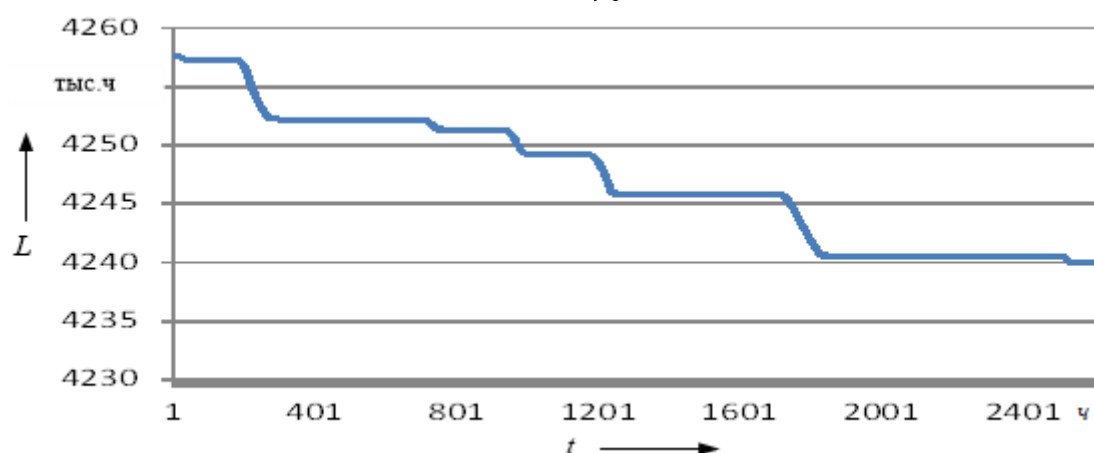


Рис. 5. Остаточный ресурс изоляции обмотки возбуждения ТЭД

Как следует из рис. 4 и 5 износ изоляции обмоток ТЭД за счет того, что токи оказались ниже номинальных, происходит медленнее астрономического времени. Например, за прошедшие 2600 ч износ обмотки якоря составил всего 113 ч, т.е. 4,3 %. При перегреве обмоток выше номинальной, соответствующей классу нагревостойкости изоляции, износ наоборот будет происходить быстрее астрономического времени работы ТЭД.

### Заключение

Представленный подход к оценке остаточного ресурса изоляции обмоток тягового электродвигателя по данным измерений токов якоря и возбуждения электроваза на основе модели теплового износа является простым и эффективным средством технического диагностирования ТЭД.

Полученная аналитическая зависимость изменения ресурса изоляции обмоток ТЭД от токовых нагрузок с накоплением по времени позволяет уточнить сроки проведения технического обслуживания и текущего ремонта ТЭД с учетом интенсивности эксплуатационных факторов.

Достоверность оценки остаточного ресурса изоляции обмоток ТЭД может быть повышена при наличии встроенных в обмотки датчиков температуры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Garramiola F, Poza J, Madina P, Del Olmo J, Almandoz G. A Review in Fault Diagnosis and Health Assessment for Railway Traction Drives. *Applied Sciences*. 2018; 8(12):2475. <https://doi.org/10.3390/app8122475>.
2. Wang, H.; Chai, T.-Y.; Ding, J.-L.; Brown, M. Data Driven Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control: Some Advances and Possible New Directions. *Acta Autom. Sin.* 2009, 35, 739–747.
3. Li, C.; Luo, S.; Cole, C.; Spiriyagin, M. An overview: Modern techniques for railway vehicle on-board health monitoring systems. *Veh. Syst. Dyn.* 2017, 55, 1045–1070.
4. Sa, J.; Choi, Y.; Chung, Y.; Kim, H.-Y.; Park, D.; Yoon, S. Replacement Condition Detection of Railway Point Machines Using an Electric Current Sensor. *Sensors* 2017, 17, 263.
5. P. Burgwinkel, F. Rensmann. *Glaser's Annalen*, 2003, № 3/4, pp. 132 – 138.
6. Худояров Д. Л. Развитие систем бортовой диагностики локомотивов // Д.Л. Худояров, И. А. Тюшев. - Текст : непосредственный // *Инновационный транспорт*. – 2018. – №. 4. – С. 43-48.
7. Розенберг Е.Н., Батраев В.В. О стратегии развития цифровой железной дороги. *Бюллетень ОУС ОАО «РЖД»*. – М.: 2018 – №1. – С. 9 – 27.
8. Худояров Д.Л. Оценка инновационных методов диагностирования неисправностей электрических цепей локомотивов /Д.Л. Худояров, Д.Н. Михин. - Текст : непосредственный // *Современная наука и молодые ученые*. – 2020. - №1 – С. 39-42.
9. Зубкович Е.М. Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава / Е.М. Зубкович // М.: Транспорт, 1992. 295 с.
10. Галкин, В. Г. Надежность тягового подвижного состава / В. Г. Галкин, В. П. Парамзик, В. А. Четвергов. – Москва : Транспорт, 1981. – 184 с. – Текст : непосредственный.
11. Исаев, Н. П. Ускоренные испытания и прогнозирование надежности электрооборудования локомотивов / Н. П. Исаев, А. П. Матвеевич, Л. Г. Козлов. – Москва : Транспорт, 1994. – 248 с. – Текст : непосредственный.
12. Андреев Г.А., Воробьев А.А., Кучин В.Д. Температурная зависимость электрической прочности ионных кристаллов при тепловом и электрическом пробое // *Известия вузов. Физика*. – 1957. – № 1. – С.128 – 140.
13. Кучин В.Д. Зависимость электрической прочности ионных кристаллов от температуры при электронной форме пробоя // *Известия вузов. Физика*. – 1958. – № 2. – С.114 – 120.
14. Дульский, Е. Ю. Система мониторинга состояния изоляции / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева, М. А. Дивинец, А. А. Корсун, // *Железнодорожный транспорт*, 2021, №(3), с. 50-52.
15. Исмаилов Ш.К. Повышение ресурса изоляции обмоток электрических машин подвижного состава в условиях эксплуатации: диссертация доктора технических наук: 05.22.07 / Шафигула Калимуллович Исмаилов; Омский гос. университет путей сообщения – Омск, 2004. –418 с.
16. Литовченко В. В. Математическая модель коллекторного тягового электродвигателя / В. В. Литовченко, Д. В. Кокорин, Д. В. Назаров - Текст : непосредственный // *Электротехника*. – 2014. – №. 8. – С. 22-28
17. Гулый И. М. Цифровые решения в секторе производства железнодорожного подвижного состава / И.М. Гулый. - Текст : непосредственный // *Транспортное дело России*. – 2020. – №. 5. – С. 38-41.
18. Находкин, М.Д. Проектирование тяговых электрических машин / Учебное пособие для вузов ж. д. трансп. Изд. 2-е, перераб. и доп. / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, М.И. Бочаров, М.А. Козорезов // М.: Транспорт, 1976. 624 с.
19. Щербаков, В.Г. Тяговые электрические машины: учебник. / В.Г. Щербаков, А.Д. Петрушин // М.: ФГБУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. 641 с.

20. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации часть 3. Описание и работа системы управления и измерения 2ЭС6.00.000.000.РЭ2. – Екатеринбург: «Уральские локомотивы», 2010. – 123 с.

21. Петушков, М. Ю. Оценка ресурсосбережения электрооборудования / М. Ю. Петушков, А. С. Сарваров, О. В. Федоров. – Текст : непосредственный // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 3. – С. 24 – 28.

## BIBLIOGRAPHY

1. Garramiola F, Poza J, Madina P, Del Olmo J, Almandoz G. A Review in Fault Diagnosis and Health Assessment for Railway Traction Drives. Applied Sciences. 2018; 8(12):2475. <https://doi.org/10.3390/app8122475>.

2. Wang, H.; Chai, T.-Y.; Ding, J.-L.; Brown, M. Data Driven Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control: Some Advances and Possible New Directions. Acta Autom. sin. 2009, 35, 739–747.

3. Li, C.; Luo, S.; Cole, C.; Spiriyagin, M. An overview: Modern techniques for railway vehicle on-board health monitoring systems. Veh. Syst. Dyn. 2017, 55, 1045–1070.

4. Sa, J.; Choi, Y.; Chung, Y.; Kim, H.-Y.; Park, D.; Yoon, S. Replacement Condition Detection of Railway Point Machines Using an Electric Current Sensor. Sensors 2017, 17, 263.

5. P. Burgwinkel, F. Rensmann. Glasers Annalen, 2003, no. 3/4, pp. 132-138.

6. Khudoyarov D.L. Development of systems for on-board diagnostics of locomotives // D.L. Khudoyarov, I. A. Tyushev. - Text: direct // Innovative transport. – 2018. – no. 4. - S. 43-48.

7. Rozenberg E.N., Batraev V.V. On the development strategy of the digital railway. Bulletin of the OUS of Russian Railways. - M.: 2018 - No. 1. - P. 9 - 27.

8. Khudoyarov D.L. Evaluation of innovative methods for diagnosing faults in electrical circuits of locomotives /D.L. Khudoyarov, D.N. Mikhin. - Text: direct // Modern science and young scientists. - 2020. - No. 1 - S. 39-42.

9. Zubkovich E.M. Rules for the repair of electrical machines of electric rolling stock / E.M. Zubkovich // M.: Transport, 1992. 295 p.

10. Galkin, V. G., Paramzik, V. P., and Chetvergov, V. A. Reliability of traction rolling stock. - Moscow: Transport, 1981. - 184 p. – Text : direct.

11. Isaev, N. P., Matveevich A. P., Kozlov L. G. Accelerated testing and prediction of the reliability of electrical equipment of locomotives. - Moscow: Transport, 1994. - 248 p. – Text : direct.

12. Andreev G.A., Vorobyov A.A., Kuchin V.D. Temperature dependence of the electrical strength of ionic crystals during thermal and electrical breakdown. Izvestiya vuzov. Physics. - 1957. - No. 1. - P. 128 - 140.

13. Kuchin V.D. Dependence of the electrical strength of ionic crystals on temperature in the electronic form of breakdown. Izvestiya vuzov. Physics. - 1958. - No. 2. - P. 114 - 120.

14. Dulsky, E. Yu. Dulsky E. Yu., Ivanov P. Yu., Khamnaeva A. A., Divinets M. A., Korsun A. A. Monitoring system for the state of insulation / Railway transport, 2021, No. (3), p. 50-52.

15. Ismailov Sh.K. Increasing the insulation resource of the windings of electric machines of rolling stock under operating conditions: thesis of a doctor of technical sciences: 05.22.07 / Shafigula Kalimullovich Ismailov; Omsk State University of Communications - Omsk, 2004. - 418 p.

16. Litovchenko V. V. Mathematical model of a collector traction motor / V. V. Litovchenko, D. V. Kokorin, D. V. Nazarov - Text: direct // Electrical engineering. – 2014. – no. 8. - S. 22-28.

17. Gulyi I. M. Digital solutions in the sector of production of railway rolling stock / I.M.



Guly. - Text: direct // Transport business of Russia. – 2020. – no. 5. - S. 38-41.

18. Nakhodkin, M.D. Design of traction electric machines / Textbook for universities. d. transp. Ed. 2nd, revised. and additional / M.D. Nakhodkin, G.V. Vasilenko, M.I. Bocharov, M.A. Kozorezov // M.: Transport, 1976. 624 p.

19. Shcherbakov, V.G. Traction electric machines: textbook. / V.G. Shcherbakov, A.D. Petrushin // M.: FGBU "Educational and methodological center for education in railway transport", 2016. 641 p.

20. Freight direct current electric locomotive 2ES6 with collector traction motors. Operation manual part 3. Description and operation of the control and measurement system 2ES6.00.000.000.RE2. - Yekaterinburg: "Ural locomotives", 2010. - 123 p.

21. Petushkov, M. Yu., Sarvarov, A. S., Fedorov, O. V. Assessment of resource saving of electrical equipment. - Text: direct // Electrical equipment: operation and repair. - 2015. - No. 3. - S. 24 - 28.

### **Информация об авторах**

*Соловьёв Дмитрий Николаевич* - аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог». Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС). 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35. E-mail: [dmitriy\\_19.81@mail.ru](mailto:dmitriy_19.81@mail.ru).

*Лаврухин Андрей Александрович* – к.т.н., доцент, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС). 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35. E-mail: [a.a.lavrukhin@yandex.ru](mailto:a.a.lavrukhin@yandex.ru)

### **Information about the authors**

*Solovyov Dmitry Nikolaevich* - post - graduate student of the department "Rolling stock of electric railways". Omsk State Transport University (OmGUPS). 644046, Omsk, Marx Ave., 35. E-mail: [dmitriy\\_19.81@mail.ru](mailto:dmitriy_19.81@mail.ru).

*Lavrukhin Andrey Aleksandrovich* – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Omsk State Transport University (OmGUPS). 644046, Omsk, 35 Marx Ave., E-mail: [a.a.lavrukhin@yandex.ru](mailto:a.a.lavrukhin@yandex.ru)