

Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.42+06

doi: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-69-75

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПОСЛЕ ЗАВОДСКОГО РЕМОНТА

Павел Валентинович Губарев¹, Иван Валерьевич Больших², Темур Зурабович
Талахадзе³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону, Россия

¹ pavel.gybarev@yandex.ru; 0000-0003-3266-9641

² ivan.bolshih@yandex.ru; 0000-0001-9433-3356

³ 086temur086@gmail.com; 0000-0002-1678-7464

Аннотация

Целью данной работы является исследование тепловых режимов тяговых электродвигателей (ТЭД) электровоза после проведения заводского ремонта. Сравнение теоретического и практического методов определения температуры меди обмотки якоря тягового двигателя после проведения заводского ремонта. Определение тепловых режимов работы ТЭД проводилось теоретически, с использованием методов математического моделирования, и экспериментально - методом ИК-диагностики.

Научная новизна работы заключается в подтверждении возможности применения методов математического моделирования при испытаниях тяговых электродвигателей после ремонта.

Температура меди обмотки якоря теоретическим (расчетным) путем с учетом охлаждающего воздуха составила 105°C, а практическим, при испытании тяговых электродвигателей в часовом режиме, температура составила 101°C. Погрешность между теоретическим и практическим методом диагностирования составляет менее 4 %, что говорит об актуальности и возможности применения данной методики теплового контроля при дальнейших испытаниях тяговых электродвигателей.

Ключевые слова: эксплуатации, локомотивы, температура, обмотки, актуальность, методики, контроль.

Благодарности: авторы выражают благодарность руководству Ростовского электровозоремонтного завода и Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения за оказанную поддержку в ходе выполнения исследований.

Original article

Open Access Article

METHODS OF STUDYING THE THERMAL CONDITIONS OF LOCOMOTIVE TRACTION MOTORS DURING TESTS AFTER FACTORY REPAIRS

Pavel Valentinovich Gubarev¹, Ivan Valeryevich Bolshykh², Temur Zurabovich
Talakhadze³

^{1,2,3} Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

¹ pavel.gybarev@yandex.ru; 0000-0003-3266-9641

² ivan.bolshih@yandex.ru; 0000-0001-9433-3356

³ 086temur086@gmail.com; 0000-0002-1678-7464

Abstract

This work objective is to study the thermal conditions of traction electric motors (TEM) of an electric locomotive after factory repairs. Comparison of theoretical and practical methods for defining the temperature of the armature copper of a traction motor after factory repairs.

Thermal modes of TEM operation were defined theoretically, using methods of mathematical modelling, and experimentally by the method of IR diagnostics.

The scientific novelty of the work lies in the confirmation of the possibility of using mathematical modelling methods when testing traction motors after repairs.

The temperature of the armature copper theoretically (by calculation), taking into account the cooling air,

was 105 °C, and in practice, when testing traction motors hourly, the temperature was 101 °C.

The error between the theoretical and practical methods of diagnosing is less than 4%, which indicates the relevance and possibility of using this method of thermal control during further tests of traction motors.

Keywords: operation, locomotives, temperature, windings, relevance, methods, control.

Acknowledgements: the authors express their gratitude to the management of Rostov Electric Locomotive Plant and Rostov State Transport University for their support during the research.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the management of the Rostov Electric Locomotive Repair Plant and the Rostov State University of Communications for their support during the research

Введение

В процессе эксплуатации локомотивов на сети железных дорог России они подвергаются значительным нагрузкам и воздействию природно-климатических факторов. Это оказывает большое влияние на тягово-энергетические показатели в эксплуатации, а также объём их технического обслуживания и ремонта [1]. На основании проведенного анализа внезапных отказов и неисправностей узлов и агрегатов локомотивов удалось установить, что тяговые электродвигатели (ТЭД) являются одним из наиболее уязвимых объектов. Работа в условиях значительных перепадов температур и периодических перегрузок, связанных с неравномерностью загрузки, может привести к многочисленным неисправностям: ускорению старения изоляции и её разрушению; ухудшению характеристик смазочных материалов; нарушению работы отдельных узлов. По этим причинам задача совершенствования технологии ремонта тяговых электродвигателей, которая позволит обеспечить сохранение и восстановление оптимальных параметров их работы, является крайне актуальной [2, 3, 4].

Применение современных и надежных средств мониторинга, которые могут обнаружить отклонение рабочих параметров ТЭД от нормы, позволит снизить количество отказов в эксплуатации. Эта задача является особенно актуальной после проведения ремонтных работ [5, 6, 7, 8].

В последнее время, среди современных методов контроля и оценки состояния узлов и агрегатов локомотива, наиболее широкое распространение получают тепловизионные методы (ТК). Несмотря на высокую стоимость аппаратных средств ТК, число тепловизоров, находящихся в эксплуатации, ежегодно увеличивается. Целесообразность этих вложений объясняется широким диапазоном возможностей по обследованию узлов и агрегатов локомотивов современными средствами ТК.

Результат проведения анализа применяемых методов контроля показал, что точность и эффективность большинства методик зависит от квалификации оператора. Опыт и такая информация, как ответственность узла, возможность исправления и другие субъективные факторы часто оказывают влияние на принятие решения.

Таким образом, можно сделать вывод, что на сегодняшний день состояние дел в области инфракрасной термографии характеризуется острой нехваткой информации об опыте и способах обследования объектов, а это в свою очередь сопровождается низкой эффективностью применения дорогостоящей аппаратуры, а также приводит к ошибкам в оценке реального состояния оборудования и, как следствие, к внезапным отказам силового оборудования.

Материалы, модели, эксперименты и методы

В ходе проведения исследований был выполнен анализ токовых нагрузок силовой схемы электровоза, которые приводят

к образованию источников нагревания. Выполненный анализ показал возможность и целесообразность диагностирования от-

дельных элементов электрооборудования на различных режимах работы. Эти выводы были подтверждены в ходе испытаний технических средств в реальных условиях при организации ремонта и эксплуатации.

Испытания тяговых электродвигателей электровоза после проведения заводского ремонта выполнялись методом взаимной нагрузки с целью исследования их тепловых режимов при помощи переносного тепловизора *NEC TH-9100*.

Тепловизоры данной серии обладают достаточно высоким уровнем точности. При выборе оборудования для проведения экспериментальных исследований данный тепловизор оказался одним из самых функциональных. Применяемый прибор обладает следующими техническими характеристиками: диапазон измерений температуры (диапазон 1: -20 – $+100$ °C/ -40 – $+120$ °C; диапазон 2: 0 – $+250$ °C/ 0 – 500 °C; диапазон 4(опция): 200 – 2000 °C/ -); детектор (Неохлаждаемая микроболометрическая матрица 320×240 элементов); порог температурной чувствительности ($0,08/0,1$ °C при измерении с частотой

60 Гц; $0,04/0,05$ °C – при осреднении 16 измерений); оптическое поле зрения, по горизонтали x по вертикали ($21,7^\circ \times 16,4^\circ$); спектральный диапазон (8 – 14 мкм); частота развертки изображения, кадров/с (60 Гц); регулируемая излучательная способность (от $0,10$ до $1,00$ (с шагом $0,01$)); передача данных (*RS-232*, *IEEE1394 + PAL*, *NTSC*, *S-video*); источник питания (аккумулятор (*Li-ion*) или от адаптера сети 220 В); габаритные размеры, длина x ширина x высота ($189 \times 108 \times 113$ мм); погрешность измерения температуры (± 2 °C, но не менее ± 2 %); вес (вместе с батареями) не более $1,7$ кг. Условия эксплуатации тепловизора по температурному диапазону находятся в пределах от -15 °C до $+50$ °C, а относительная влажность должна быть в пределах от 10 % до 90 % без конденсации.

Измерения параметров тяговых электродвигателей методом взаимной нагрузки проводились на стенде испытательной станции электромашинного цеха Ростовского электровазоремонтного завода (РЭРЗ) АО «Желдорреммаш» (рис. 1 и 2) для часового режима работы.



Рис. 1. Информационно-вычислительная часть стенда для испытания тяговых электродвигателей

Fig. 1. Information and computing part of the stand for testing traction electric motors



Рис. 2. Внешний вид стенда для испытания тяговых электродвигателей

Fig. 2. Appearance of the test bench for traction electric motors

Основная часть

Наиболее уязвимыми при воздействии критических температур являются обмотки электрических машин. Механический и тепловой износ изоляции вызывают их повреждения, а также способствуют преждевременному выходу из строя электрической машины. Для своевременного выявления перегрева обмоток электродвигателей предлагались различные методы. Одним из методов оценки температуры являлось определение теплового состояния коллектора и якоря по температуре охлаждающего воздуха на входе и выходе и по его расходу. Также ранее предлагались различные устройства, определяющие температуру поверхности изоляции по разнице температур поступающего охлаждающего воздуха и отработанного воздуха на выходе из корпуса элек-

трической машины. Но данные методы не являются объективными, т. к. при их использовании имеется множество влияющих на оценку температуры обмотки факторов, таких как скорость движения воздуха, его химические и физические свойства, качество воздушных фильтров, технические характеристики вентиляторов и т. д. [9].

Определение превышений температуры обмоток выполняем для часового режима работы, по возможности с учетом тех видов дополнительных потерь, возникающих при работе на пульсирующем токе, которые поддаются достаточно точному определению [10, 11]. Температуру меди обмотки якоря тягового двигателя НБ-520В определим из уравнения

$$T_M = \frac{\sum \Delta P_M \left[1 + \frac{\alpha_a}{\lambda_{из.а} p'} \left(t_1 + \frac{m_k \pi d_k}{2Z} \right) \right] + \sum \Delta P_{сa} \left(1 - \frac{\alpha_a}{\lambda_{из.а} p'} t_1 \frac{l_l}{l_a} \right)}{\alpha_a \pi \left[D_a (l_a + l_n) + \frac{m_k d_k}{2} l_a \right]} + T_B,$$

где $\sum \Delta P_M$ – суммарные потери в меди обмотки якоря, Вт; α_a – коэффициент теплопередачи, Вт/(°С·м²); $\lambda_{из.а}$ – удельная теплопроводность пазовой изоляции, Вт/(°С·м²); p' – приведенный периметр паза, м; t_1 , t_r – температурные коэффициенты; m_k – масса участков зубцов якоря, кг;

d_k – удельный температурный коэффициент для зубцового слоя якоря, 1/кг; Z – количество зубцов якоря; $\sum \Delta P_{сa}$ – суммарные потери в стали якоря, Вт; l_l , l_a – размеры зубцового слоя якоря, м; D_a –

диаметр якоря, м; T_B – температура вентилируемого воздуха, °С.

В результате подстановки известных численных значений температура меди обмотки якоря тягового двигателя НБ-520В составила 105 °С.

Результаты экспериментальных исследований по определению температуры нагрева элементов коллекторно-щёточного аппарата тяговых электродвигателей локомотива с использованием тепловизора NEC TH9100 при их испытании методом взаимной нагрузки на стенде для часового режима работы представлены на рис. 3.

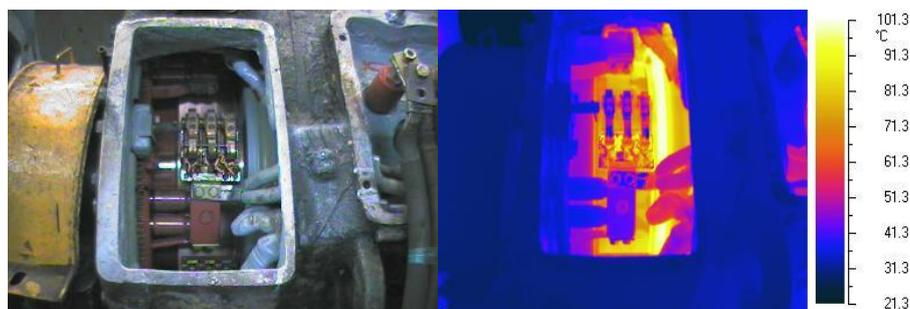


Рис. 3. Вид через коллекторный люк тягового двигателя
Fig. 3. View through the collector hatch of the traction electric motor

Выводы

1. Опытная эксплуатация предложенного авторами метода ИК-диагностики показала высокую вероятность обнаружения дефектных узлов тяговых двигателей электровозов после проведения заводского ремонта.

2. Температура меди обмотки якоря теоретическим (расчетным) путем с учетом охлаждающего воздуха составила 105°C, а практическим, при испытании тяговых электродвигателей в часовом режиме, температура составила 101°C. Погрешность между теоретическим и практическим методом диагностирования составляет менее 4%, что говорит об актуальности и возможности применения данной методики теплового контроля при дальнейших испытаниях тяговых электродвигателей.

3. Применение теоретического метода определения нагрева различных узлов силовой схемы локомотива особенно актуальна при организации ремонта локомотивов за счет экономии времени и средств.

4. Основными критериями эффективности тепловизионной диагностики являются:

– наличие методической базы, которая позволит наиболее точно и достоверно проводить оценку состояния оборудования локомотивов;

– высокая квалификация технического персонала, подкрепленная знанием конструкции и принципа работы оборудования, а также методику проведения его обследования и обработки полученных результатов;

– наличие современных технических средств мониторинга.

5. На получаемые результаты обследования оказывают влияние такие факторы, как нагрузка, климатические условия, дальность, излучающая способность поверхности и др.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Grebennikov N., Zarifyan A., Zarifyan A. (jr.), Talakhadze T., Romanchenko N., Shapshal A. Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive. 2019 26th International Workshop on Electric Drives: *Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*. Publisher: IEEE. 2019. 18527220. doi: 10.1109 / IWED.2019.8664283.
2. Shapshal A., Gubarev P., Glazunov D. Refined Collector Thermal Design for Electric Locomotive Traction Engine. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering*. 2020. p. 331-337. doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_40.
3. Жоголев Е.Н. Исследование причин возникновения неисправностей тяговых электродвигателей на грузовых электровозах постоянного тока 2ЭС6. *Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXXIV Международной научно-практической конференции: в 2 ч. - Пенза, 2020. С. 76-79.*
4. Харламов В.В., Шкодун П.К., Сергеев Р.В., Долгова А.В. Совершенствование технологии диагностирования тяговых электродвигателей после проведения ремонта в условиях локомотивного депо. *Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: сб. трудов конференции, Омский государственный университет путей сообщения. – Омск: Изд-во Омского ГУПС, 2013. С. 53-60.*
5. Губарев П.В., Шапшал А.С., Курочкин А.С. Анализ результатов испытаний тепловизионного контроля электровозов переменного тока. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 7. С. 142-147.
6. Белан Д.Ю., Хасеинов К.Б., Дюндин В.В., Кубрина Т.В., Кубрина И.В. Разработка технологического оборудования для совершенствования технологии ремонта тяговых электродвигателей. *Современные материалы, техника и технология: сб. тр. конференции. Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. Курск, Изд-во ЮЗГУ, 2013. С. 47-50.*
7. Липа К.В., Белинский А.А., Лакин И.К. [и др.] Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов в ТМХ-Сервис. Теория и практика. Москва: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. 211 с. ISBN 978-5-9905057-3-5.
8. Губарев П.В., Больших И.В., Шабаев В.В. Анализ существующих диагностических комплексов для контроля уровня вибрации узлов локомотивов. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. Москва: Инновационное машиностроение, 2020. С. 318-320.
9. Грищенко М.А. Повышение надёжности обмотки якоря тягового электродвигателя. *Изве-*

стия Петербургского университета путей сообщения. 2009. С. 62–68.

10. Губарев П.В., Шапшал А.С., Больших И.В. Объективная оценка степени полимеризации электроизоляционных материалов при сушке обмоток якорей тяговых двигателей электровозов. *Известия Тульского государственного уни-*

верситета. *Технические науки*. 2020. № 2. С. 477–483.

11. Губарев П.В., Талахадзе Т.З., Зинченко Н.Н. Исследование по контролю изоляции электрических аппаратов и машин. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. Москва: Инновационное машиностроение, 2020. С. 248–250.

REFERENCES

1. Grebennikov N., Zarifyan A., Zarifyan A. (jr.), Talakhadze T., Romanchenko N., Shapshal A. Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive. 2019 26th International Workshop on Electric Drives: *Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*. Publisher: IEEE. 2019. 18527220. doi: 10.1109 / IWED.2019.8664283.
2. Shapshal A., Gubarev P., Glazunov D. Refined Collector Thermal Design for Electric Locomotive Traction Engine. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering*. 2020. p. 331-337. doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_40.
3. Zhogolev E.N. Study of malfunctions causes of traction electric motors for DC freight locomotives 2ES6. *Fundamental and applied scientific research: current issues, achievements and innovations*: Collected papers of the XXXIV International Scientific and Practical Conference: in 2 parts. - Penza, 2020. pp. 76-79.
4. Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Sergeev R.V., Dolgova A.V. Improvement of the technology to diagnose traction electric motors after repair in the conditions of a locomotive depot. *Technological support of repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock*: Collected papers of the Conference, Omsk State Transport University. - Omsk: Publishing House of Omsk State Unitary Enterprise, 2013. pp. 53-60.
5. Gubarev P.V., Shapshal A.S., Kurochkin A.S. Analysis of the test results of the thermal vision control of AC electric cars. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2020. no. 7. pp. 142-147.
6. Belan D.Yu., Khaseinov K.B., Dyundin V.V., Kubrina T.V., Kubrina I.V. Development of technological equipment for improving the technology of repairing traction motors. *Modern materials, equipment and technology*: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference. Kursk, SWSU Publishing House, 2013. pp. 47-50.
7. Lipa K.V., Belinsky A.A., Lakin I.K. [et al.] Monitoring of the technical condition and operating modes of locomotives in TMKH-Service. Theory and Practice. Moscow: OOO Locomotive Technologies, 2015. 211 p. ISBN 978-5-9905057-3-5.
8. Gubarev P.V., Bolshykh I.V., Shabaev V.V. Analysis of existing diagnostic complexes for monitoring the vibration level of locomotive assemblies. *Sborka v Mashinostroenii, Priborostroenii [Assembly in Mechanical Engineering, Instrumentation]*. Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2020. pp. 318-320.
9. Grishchenko M.A. Improving the reliability of the armature copper of the traction motor. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2009. pp. 62-68.
10. Gubarev P.V., Shapshal A.S., Bolshykh I.V. An objective assessment of the degree of polymerization of insulating materials by drying the armature winding traction motors of electric locomotives. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2020. no. 2. pp. 477-483.
11. Gubarev P.V., Talakhadze T.Z., Zinchenko N.N. Research on insulation control of electrical devices and machines. *Sborka v Mashinostroenii, Priborostroenii [Assembly in Mechanical Engineering, Instrumentation]*. Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2020. pp. 248-250.

Ссылка для цитирования:

Губарев, П.В. Методы проведения исследования тепловых режимов тяговых двигателей локомотива при испытаниях после заводского ремонта / П. В. Губарев, И. В. Больших, Т. З. Талахадзе // *Транспортное машиностроение*. – 2022. – № 1-2. – С. 69 – 75. doi: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-69-75.

Информация об авторах:

Губарев Павел Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета путей сообщения, тел. 8-906-424-91-02.

Больших Иван Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной

состав» Ростовского государственного университета путей сообщения, тел. 8-988-503-31-44.

Талахадзе Темур Зурабович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета путей сообщения, тел. 8-918-537-44-49.

Gubarev Pavel Valentinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Traction Rolling Stock at Rostov State Transport University, phone: 8-906-424-91-02.

Bolshykh Ivan Valeryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of

Traction Rolling Stock at Rostov State Transport University, phone: 8-988-503-31-44.

Temur Zurabovich Talakhadze, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Traction Rolling Stock at Rostov State Transport University, phone: 8-918-537-44-49.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.09.2021; одобрена после рецензирования 22.10.2021; принята к публикации 15.01.2022. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 22.09.2021; approved after review on 22.10.2021; accepted for publication on 15.01.2022. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.