

А. Ю. Портной, К. П. Селедцов, О. В. Мельниченко, В. Н. Иванов

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ НАГРЕВЕ ОСТОВА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НБ-514

***Аннотация.** Целью данной работы является определение причин возникновения трещин в остовах тяговых двигателей электровозов. Использован способ математического моделирования на ЭВМ с применением метода конечных элементов. Рассмотрены результаты математического моделирования механических напряжений, возникающих в остове тягового электродвигателя НБ-514 при его неравномерном нагреве. Показано, что механические напряжения, возникающие только из-за разности температур, могут достигать 100 МПа. При коррекции формы вентиляционных окон остова тягового электродвигателя указанные напряжения могут быть снижены до 76 МПа. Сделан вывод, что одной из основных причин образования трещин в остовах тяговых электродвигателей являются циклически повторяющиеся температурные напряжения.*

***Ключевые слова:** тяговый электродвигатель, механические напряжения, температурные напряжения, нагрев электродвигателя, математическое моделирование, тяговый электродвигательной состав.*

Aleksandr Y. Portnoy, Konstantin P. Seledtsov, Oleg V. Melnichenko, Vladimir N. Ivanov

Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

MATHEMATICAL SIMULATION OF MECHANICAL STRESSES ARISING AT UNEVEN HEATING OF THE TRACTION ELECTRIC MOTOR NB-514

***Abstract.** The purpose of this work is to determine the causes of cracks in the frame of traction motors of electric locomotives. The method of mathematical modeling on a computer with the use of FEM was used. The results of mathematical modeling of mechanical stresses arising in the frame of the NB-514 traction motor during its uneven heating are considered. It is shown that mechanical stresses arising only due to the temperature difference can reach 100 MPa. When correcting the shape of the ventilation windows of the traction motor frame, these voltages can be reduced to 76 MPa. It was concluded that one of the main reasons for the formation of cracks in the frames of traction motors are cyclically repeating thermal stresses.*

***Keywords:** traction motor, mechanical stresses, temperature stresses, heating of electric motor, math modeling, traction electric rolling stock.*

Введение

Одной из приоритетных задач в сфере железнодорожного транспорта является повышение надежности и безопасности перевозочного процесса [1]. В связи с этим, особое внимание следует уделять техническому состоянию наиболее важных узлов подвижного состава, необходимо своевременно выявлять причины ухудшения их состояния.

В настоящее время тяговыми электродвигателями НБ-514 оборудованы все электровозы серий ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К. Всего их насчитывается более 1600 единиц. Тяговые электродвигатели относятся к наиболее нагруженному оборудованию электровозов с точки зрения комплексного воздействия на них тепловых, электрических, механических и климатических факторов. Поэтому, не смотря на постоянно проводимые мероприятия технологического характера при изготовлении и ремонте локомотивов, уровень повреждаемости тяговых электродвигателей в эксплуатации остается довольно высоким [2]. При этом в исследованиях тепловых моделей тяговых электродвигателей внимание ученых уделяется тепловым процессам в обмотках двигателей, а температурные напряжения, возникающие в остове, не рассматриваются [3-11].

Следует отметить, что появление механических напряжений в остове также зависит от вибраций, возникающих от пути и переменной части магнитного поля электродвигателя, ко-

торые в настоящее время также детально не исследованы. Оценка влияния этих факторов является целью дальнейших исследований. В данной работе они не рассматриваются.

Актуальность данной статьи обусловлена образованием трещин в остовах тяговых электродвигателей. На основе производственных данных группы компаний «ЛокоТех», представленных на рисунке 1, можно сделать вывод, что каждый третий остов ТЭД в эксплуатации имеет трещины, показанные на рисунке 2, а. Причём образование трещин у разных остовов происходит в одном и том же месте (рисунок 2б). Данные трещины возникают вблизи вентиляционных окон с коллекторной стороны двигателя. Наличие таких трещин может привести к ускоренному выходу из строя двигателя, что, в свою очередь, потребует постановки электровоза на неплановый ремонт, который связан со значительными затратами. Следует отметить, что проведение измерений в зоне возникновения трещин тензометрическим методом практически не возможно из-за геометрии остова.

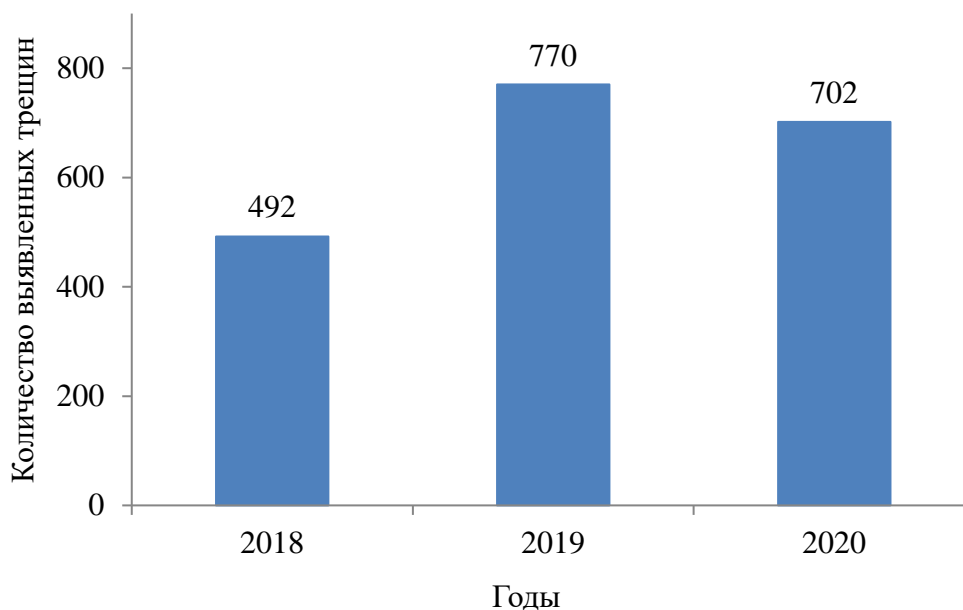
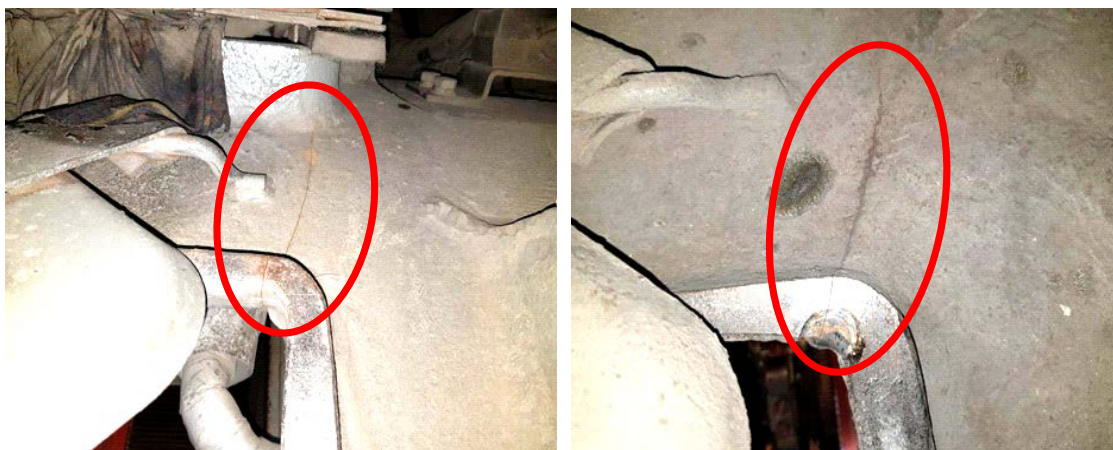
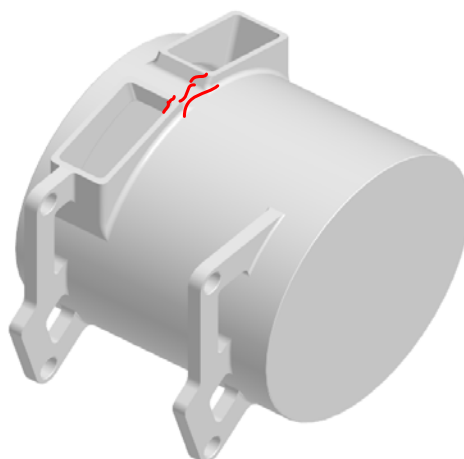


Рисунок 1 – Статистика выявления трещин в остовах тяговых двигателей электровозов ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К на Восточном полигоне



а



б

**Рисунок 2 – Трещины в остове тягового электродвигателя НБ-514:
а – фотографии возникающих трещин;
б – схема расположения трещин на упрощенной модели**

Исследование

Целью данной работы является определение причин возникновения трещин в остовах тяговых двигателей электровозов.

Изучение возникающих напряжений разделяется на две задачи – изучение температурного распределения в остове двигателя, возникающего при его нагреве, и изучение механических напряжений, возникающих вследствие тепловых деформаций.

Решение данных задач аналитическими методами является трудоемким процессом ввиду большого количества факторов, которые могут влиять на возникновение трещин в остове. Для решения таких задач эффективнее всего использовать способ математического моделирования на ЭВМ с применением метода конечных элементов.

Метод конечных элементов может быть обобщен практически на неограниченный класс задач благодаря тому, что позволяет использовать элементы различных форм для получения сеточных разбиений любых нерегулярных областей. Нагрузки и граничные условия могут иметь произвольный вид. Метод применим ко всем классам проблем распределения полей, которые включают в себя анализ конструкций, перенос тепла, течение жидкости и электромагнетизм [12-14].

При использовании метода конечных элементов модель остова разбивается на конечные элементы, достаточно точно описывающие геометрию конструкции. Криволинейная область аппроксимируется с помощью прямолинейных элементов. Размеры элементов могут быть уменьшены в тех областях, где ожидаемый результат может сильно меняться, и увеличены там, где ожидаемый результат почти постоянен. При использовании полученных значений температуры в узловых точках она может быть аппроксимирована внутри всего ко-

нечного элемента. Таким образом, может быть рассчитана температура в любой точке расчетного контура, что дает полное представление о температурном поле.

Для выявления причин возникновения трещин создана упрощенная 3D модель остова тягового электродвигателя НБ-514 (рисунок 3). С помощью программного комплекса Femap был проведен тепловой расчет остова, а затем прочностной расчет, при котором нагрузкой на остов служили рассчитанные ранее значения температуры. Для проведения расчета материалу модели были заданы свойства стали 25Л. Точки закрепления остова принимаются стандартные для опорно-осевого подвешивания тягового электродвигателя НБ-514 [15].

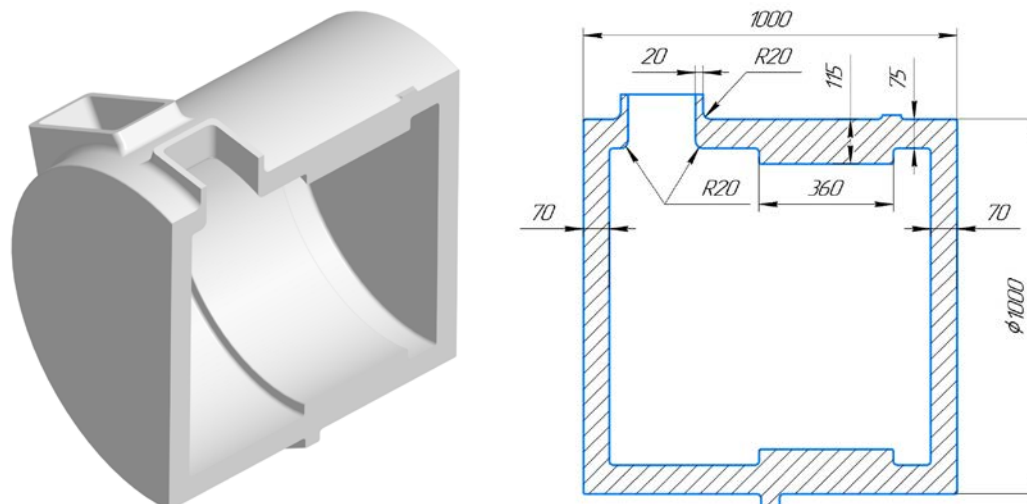


Рисунок 3 – Упрощенная модель остова тягового электродвигателя НБ-514

Для проведения теплового расчета была задана температура нагрева остова (рисунок 4). В зоне расположения обмотки возбуждения двигателя температура задана 180 °С и 40 °С в зоне вентиляционных окон, что имитирует температуру окружающего воздуха. Результаты теплового расчета представлены на рисунке 5.

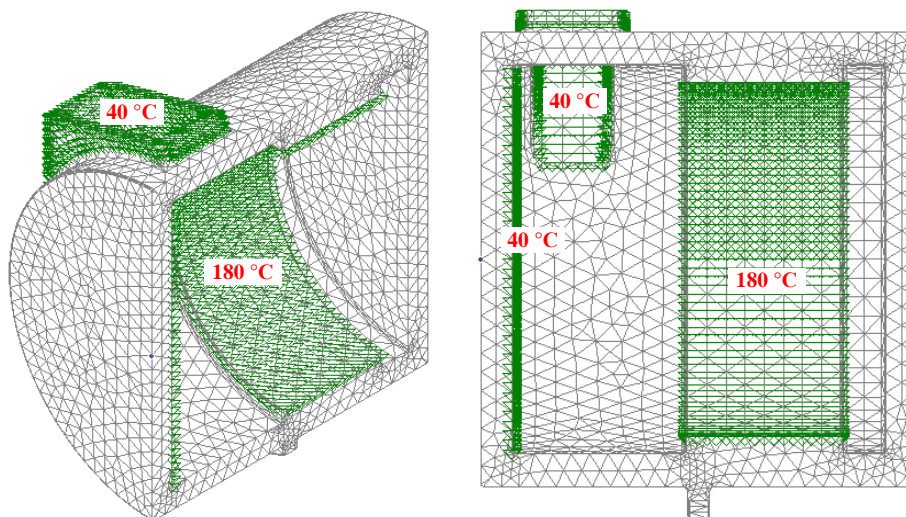


Рисунок 4 – Заданная температура нагрева остова тягового электродвигателя НБ-514

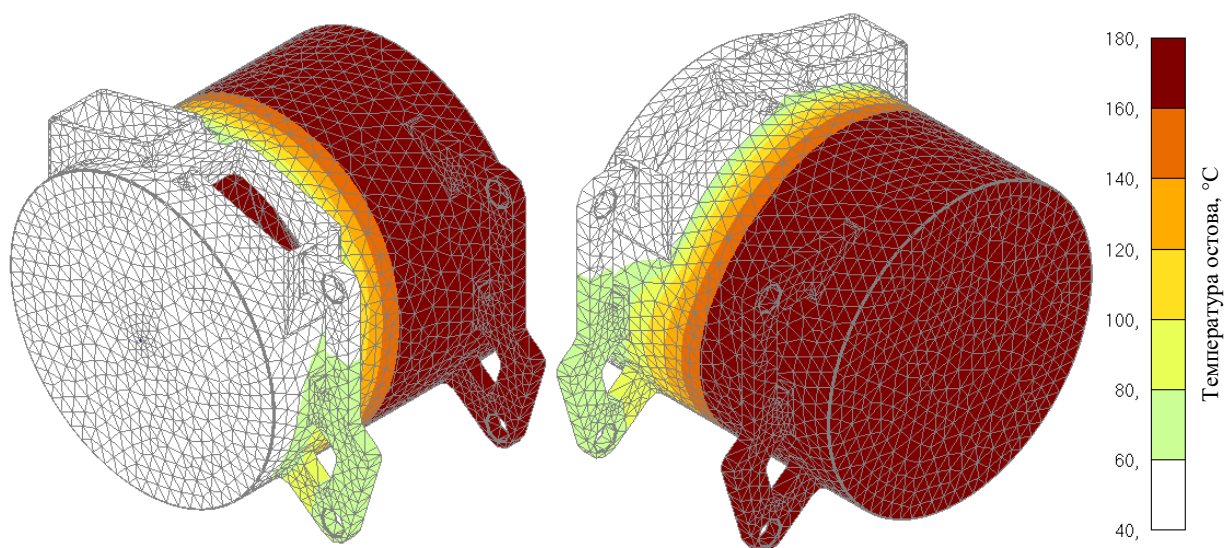


Рисунок 5 – Результаты теплового расчета остова тягового электродвигателя НБ-514

Для проведения прочностного расчета в качестве нагрузки были заданы результаты теплового расчета, полученные при нагреве остова. Анализируя полученные результаты прочностного расчета, представленные на рисунке 6, видно, что наиболее нагруженные участки модели соответствуют местам возникновения трещин в остовах тяговых двигателей при их эксплуатации (рисунок 1а).

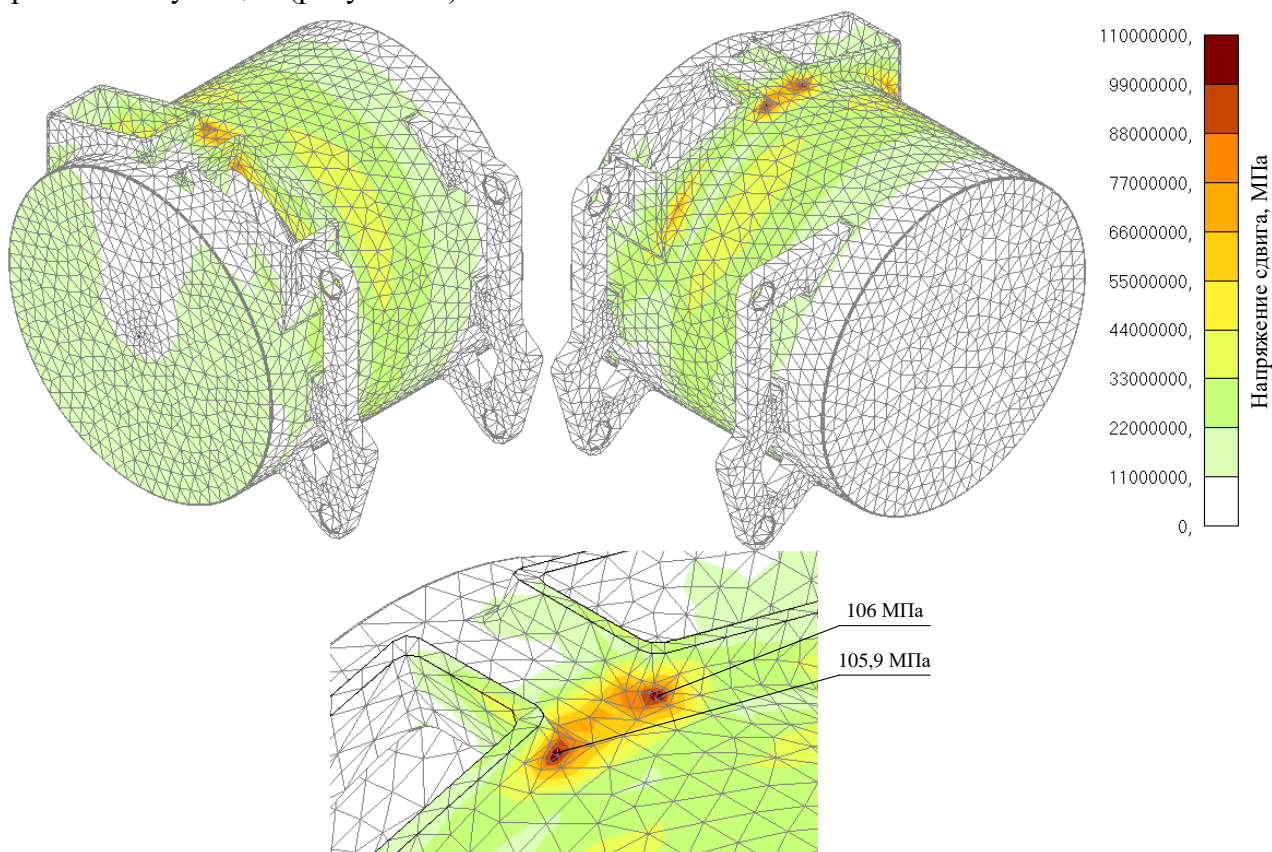
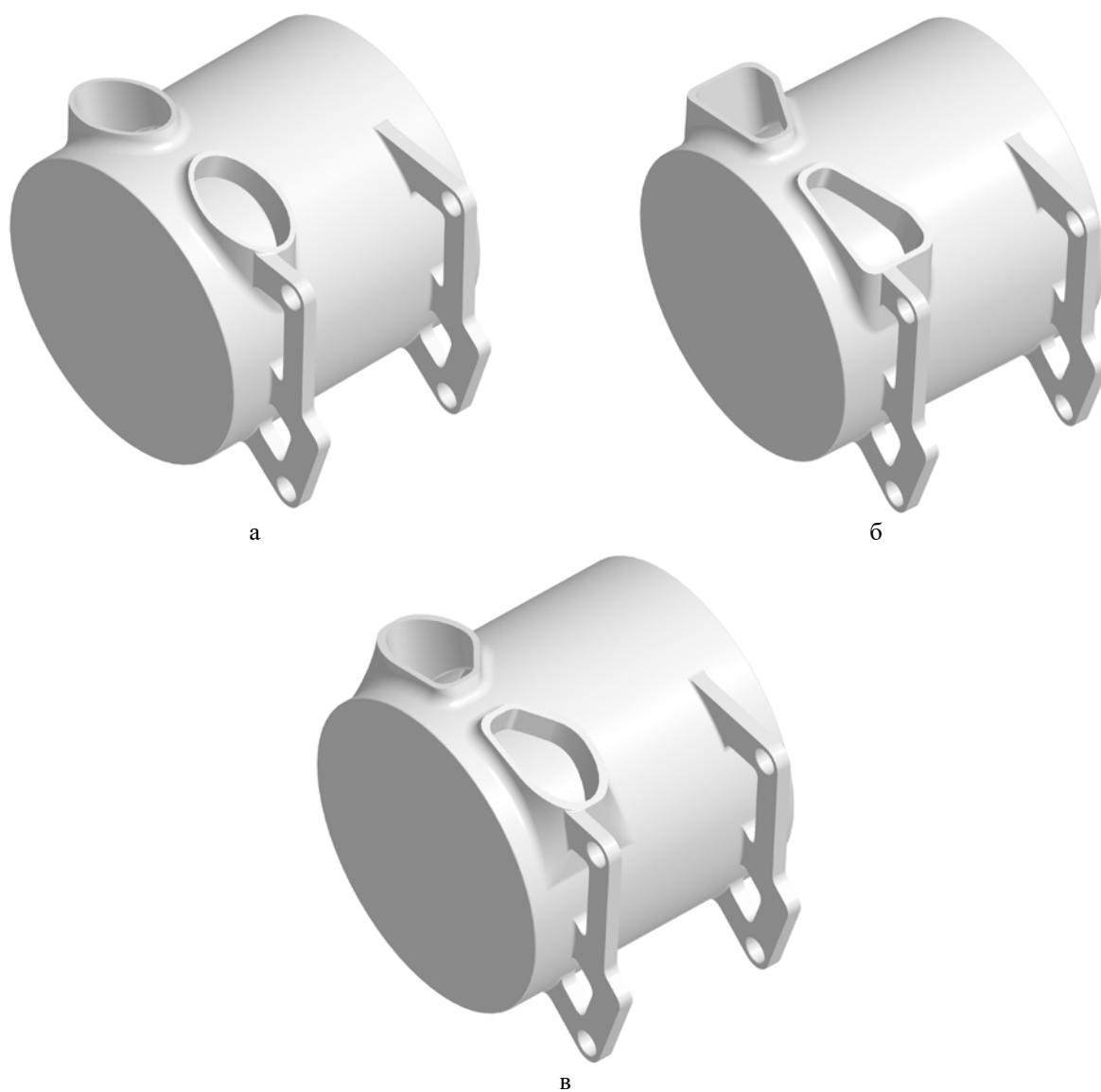


Рисунок 6 – Результаты прочностного расчета остова тягового электродвигателя НБ-514

Следовательно, одной из основных причин образования трещин в остовах тяговых электродвигателей являются циклически повторяющиеся температурные напряжения.

Для уменьшения величины температурных напряжений авторами было предложено несколько вариантов изменения конструкции вентиляционных окон остова (рисунок 7). При этом площадь вентиляционных отверстий остаётся неизменной. Результаты прочностного

расчета для каждого варианта остова тягового электродвигателя представлены на рисунках 8 – 10.



**Рисунок 7 – Предлагаемые изменения в конструкции остова тягового электродвигателя НБ-514:
а – остов с овальными окнами; б – остов с окнами в виде усеченной трапеции;
в – остов с окнами комбинированного исполнения**

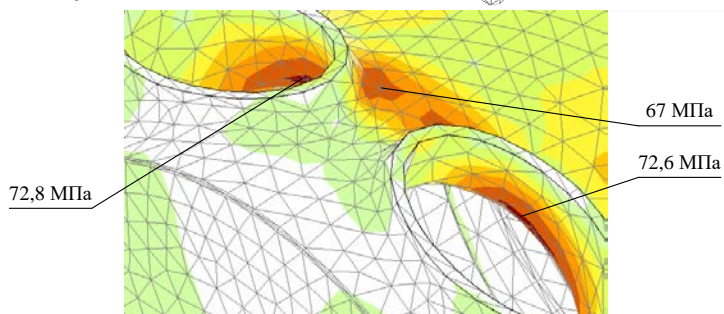
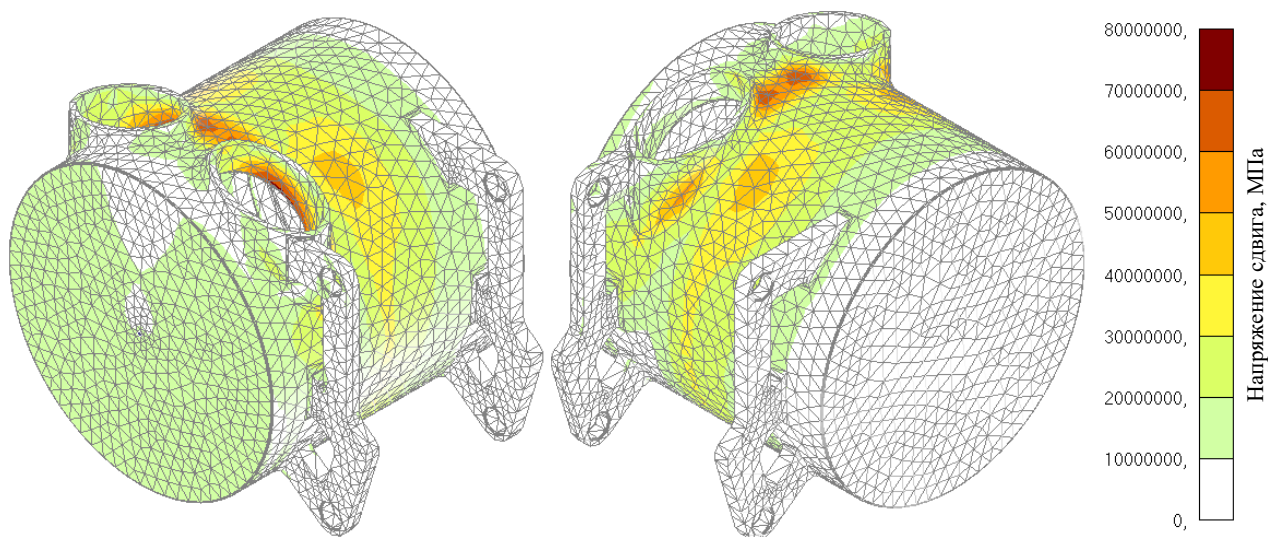


Рисунок 8 – Результаты прочностного расчета остова с овальными окнами

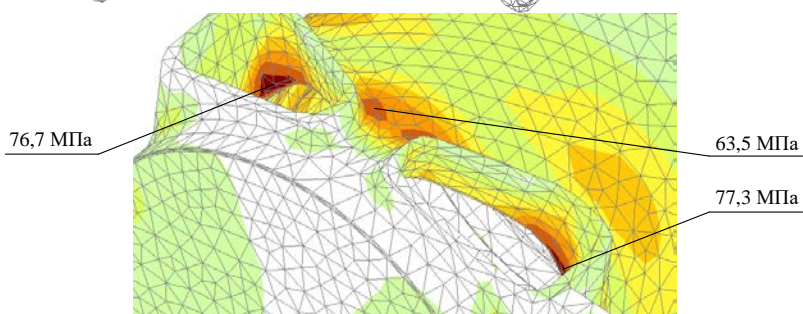
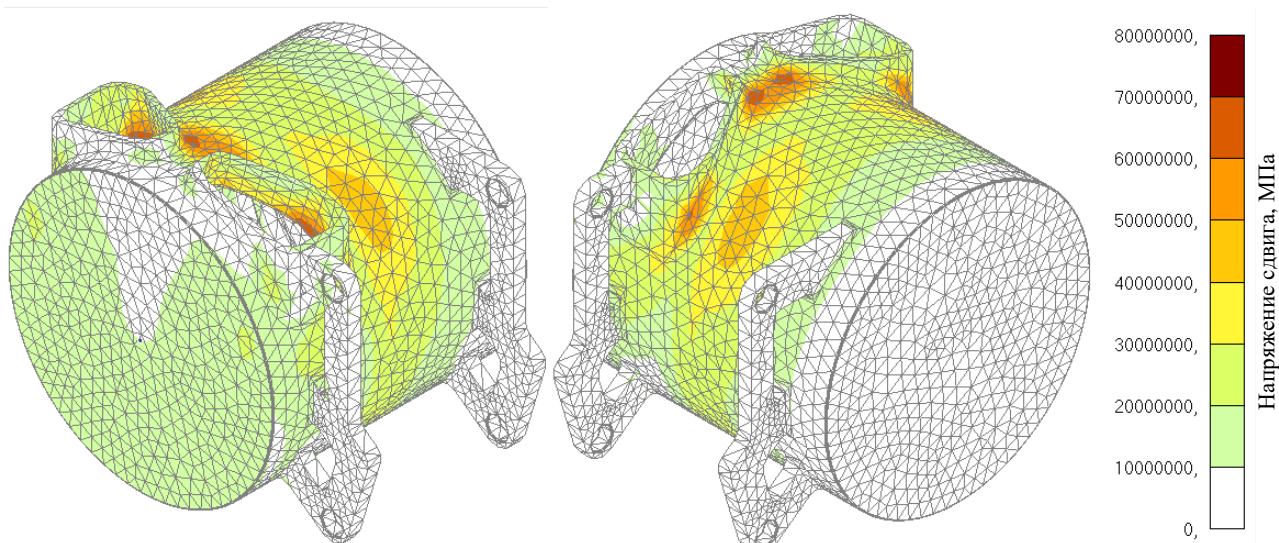


Рисунок 9 – Результаты прочностного расчета остова с окнами в виде усеченной трапеции

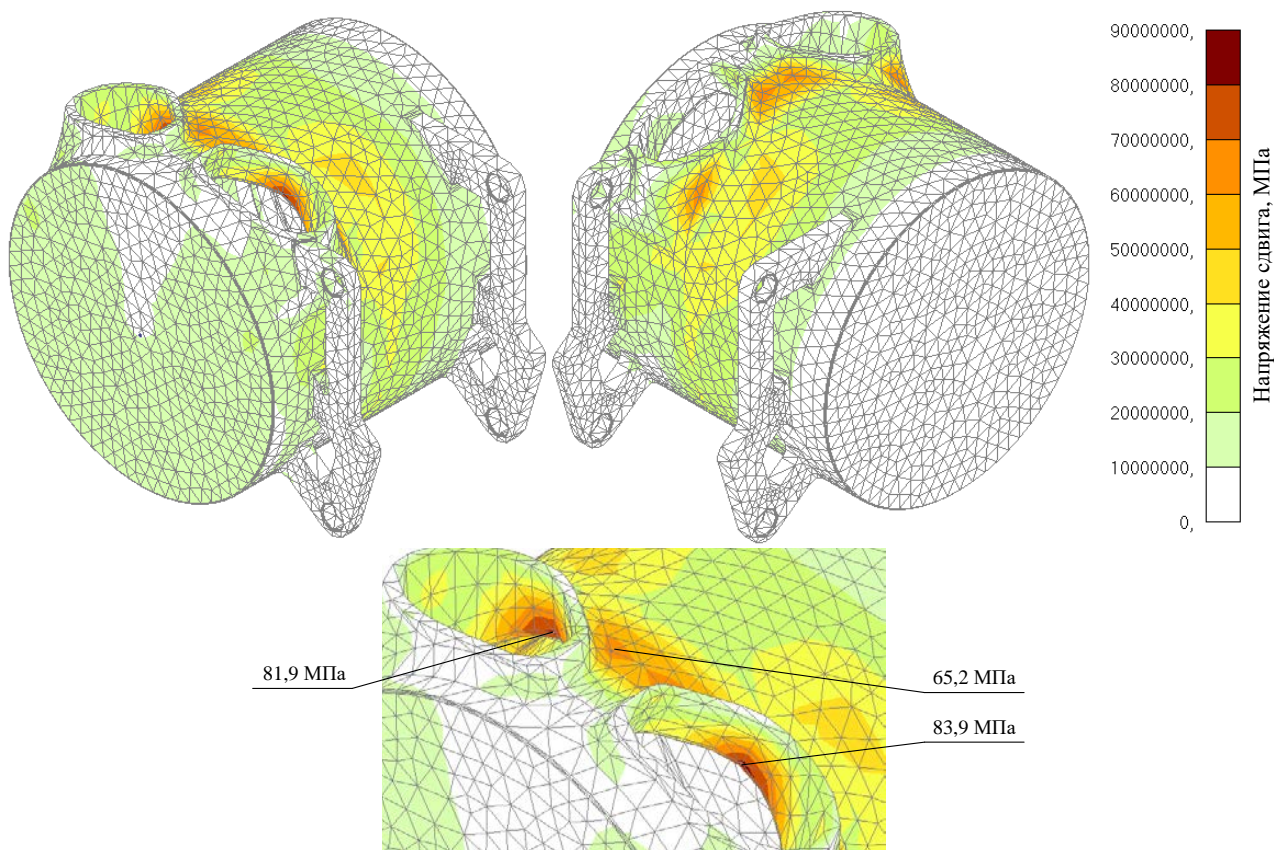


Рисунок 10 – Результаты прочностного расчета остова с окнами комбинированного исполнения

Из рисунков 8-10 видно, что изменение геометрии вентиляционных окон остова снижает величину максимальных напряжений в зоне окон на 30 %. При этом точки максимальных напряжений уходят с наружной поверхности остова вовнутрь.

Заключение

В данной статье были рассмотрены механические напряжения, возникающие при работе тягового электродвигателя НБ-514 и обусловленные его неравномерным нагревом в рабочем состоянии. Показано, что напряжения в остова тягового электродвигателя электровоза могут составлять до 100 МПа, а области их возникновения совпадают с областями часто наблюдаемых трещин в эксплуатации. Получено, что напряжения могут быть снижены со 106 МПа до 76 МПа путем изменения формы вентиляционных окон остова без дополнительного улучшения системы охлаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга» / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 63 с. Режим доступа: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf, свободный. (Дата обращения: 14.10.2020).
2. Щербатов, В. В., Рапопорт, О. Л., Цукублин, А. Б. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 156 – 159.
3. Дворкин, П. В., Курилкин, Д. Н. Анализ теплового состояния тяговых электродвигателей по данным микропроцессорной системы управления тепловоза // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 401 – 409. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-401-409.
4. Матющенко, А. В. Анализ теплового состояния тягового вентильного двигателя с постоянными магнитами для шахтного электровоза // Электротехника и Электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 15-18. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.6.03.
5. Носков, В. И. Тепловая модель тягового двигателя тепловоза // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 62 (968). – С. 142 – 147.
6. Минаев, Б. Н., Платов, Н. А. Расчет температурного поля электромашины // Мир транспорта. – 2009. – Т. 7. – № 1 (25). – С. 42 – 49.
7. Шрайбер, М. А. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя постоянного тока // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – № 4 (13). – С. 36 – 38.
8. Дурандин, М. Г., Кузьминых, И. А. Расчет электрических полей в якорной изоляции тяговых электродвигателей локомотивов с учетом теплового фактора // Вестник УрГУПС. – 2010. – № 4 (8). – С. 30 – 37.
9. Хомченко, Д. Н., Ковалев, Г. В. Исследования влияния повышенной плотности тока в щетках на процесс нагрева тягового двигателя электровоза // Вестник РГУПС. – 2019. – № 1 (73). – С. 46 – 52.
10. Chin, Y. K., Staton, D. A. Transient thermal analysis using both lumped-circuit approach and finite element method of a permanent magnet traction motor // IEEE Africon. 7th Africon Conference in Africa (IEEE Cat. No.04CH37590), Gaborone, 2004, Vol. 2, pp. 1027 – 1035. DOI: 10.1109/africon.2004.1406847.
11. Nategh, S., Zhang, H., Wallmark, O., Boglietti, A., Nassen, T., Bazant, M. Transient Thermal Modeling and Analysis of Railway Traction Motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, Vol. 66, No. 1, pp. 79 – 89. DOI: 10.1109/TIE.2018.2821619.
12. Рычков, С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran / М.: ДМК Пресс, 2013. – 784 с.: ил. ISBN 978-5-94074-638-6.
13. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. / М.: Мир, 1984. – 428 с., ил.
14. Зенкевич, О., Морган, К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. – 318 с., ил.
15. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): Руководство по эксплуатации / Новочеркасский электровозостроительный завод. – Новочеркасск, 2007. – Т. 1, 635 с.; Т. 2, 640 с.

REFERENCES

1. *Strategiia nauchno-tehnologicheskogo razvitiya holdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2025 goda. «Belaya kniga»* (The strategy of scientific and technological development of the holding «Russian Railways» for the period up to 2020 and to the perspective up to 2025. «White paper») http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf.
2. Shcherbatov V. V., Rapoport O. L., Tsukublin. A. B. *Modeling the thermal state of a traction motor for resource prediction* [Modelirovaniye teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya prognozirovaniya resursa]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 156 – 159.

3. Dvorkin P. V., Kurilkin D. N. *The analysis of traction motor thermal condition according to the data of the microprocessor-based locomotive control system* [Анализ теплового состояния тяговых электродвигателей по данным микропроцессорной системы управления тепловоза]. Proceedings of Petersburg Transport University, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 401 – 409. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-401-409.
4. Matyushchenko A. V. *Analysis of thermal state of traction brushless permanent magnet motor for mine electric locomotive* [Анализ теплового состояния тягового вентильного двигателя с постоянными магнитами для шахтного электровоза]. Electrical Engineering & Electromechanics, 2016, no. 6, pp. 15 – 18. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.6.03.
5. Noskov V. I. *Thermal model traction engine locomotive* [Тепловая модель тягового двигателя тепловоза]. Herald of the National Technical University "KhPI", 2012, no. 62 (968), pp. 142 – 147.
6. Minayev B. N., Platov. N. A. *Calculation of Temperature Field of Electric Machine* [Расчет температурного поля электромашин]. World of Transport and Transportation, 2009, vol. 7, no. 1 (25), pp. 42 – 49.
7. Shrayber. M. A. *Modeling the thermal state of a DC traction motor* [Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя постоянного тока]. Bulletin of scientific research results, 2014, no. 4 (13), pp. 36 – 38.
8. Durandin M. G., Kuzminykh I. A. *The calculation of electric field in anchor isolation of locomotives traction electric motors with the regard for thermal factor* [Расчет электрического поля в якорной изоляции тяговых электродвигателей локомотивов с учетом теплового фактора]. Herald of the Ural State University of Railway Transport, 2010, no. 4 (8), pp. 30 - 37.
9. Khomchenko D. N., Kovalev G. V. *Study of the effect of increased current density in the brushes on the heating process of the electric locomotive traction motor* [Исследование влияния повышенной плотности тока в щетках на процесс нагрева тягового двигателя электровоза]. Herald of Rostov State Transport University, 2019, no. 1 (73), pp. 46 – 52.
10. Chin Y. K., Staton D. A. *Transient thermal analysis using both lumped-circuit approach and finite element method of a permanent magnet traction motor* [Текст] // IEEE Africon. 7th Africon Conference in Africa (IEEE Cat. No.04CH37590), Gaborone, 2004, Vol. 2, pp. 1027 – 1035. DOI: 10.1109/africon.2004.1406847.
11. Nategh S., Zhang H., Wallmark O., Boglietti A., Nassen T., Bazant M. *Transient Thermal Modeling and Analysis of Railway Traction Motors* [Текст] // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, Vol. 66, No. 1, pp. 79 – 89. DOI: 10.1109/TIE.2018.2821619.
12. Rychkov S. P. *Modelirovaniye konstruksiy v srede Femap with NX Nastran* (Structural Modeling in Femap with NX Nastran). Moscow, 2013, 784 p. ISBN 978-5-94074-638-6.
13. Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy: Per. s angl.* (Finite element method. Fundamentals: Per. from English). Moscow, 1984, 428 p.
14. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnyye elementy i approksimatsiya: Per. s angl.* (Finite elements and approximation: Per. from English). Moscow, 1986, 318 p.
15. *Jelektrovoz magistral'nyj 2JeS5K (3JeS5K). Rukovodstvo po jekspluatacii* (Main-line electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operator's manual). Novocherkassk, 2007. Vol. 1. 635 p., vol. 2. 640 p.

Информация об авторах

Портной Александр Юрьевич – д. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: portnoyalex@yandex.ru.

Селедцов Константин Павлович – ассистент кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kostyans7kss@gmail.com.

Мельниченко Олег Валерьевич – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-

mail: olegmelnval@mail.ru.

Иванов Владимир Николаевич – к. т. н., доцент кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: v.n.ivanov40161@yandex.ru.

Authors

Aleksandr Yuryevich Portnoy – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department «Physics, Mechanics and Instrument Engineering», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: portnoyalex@yandex.ru.

Konstantin Pavlovich Seledtsov – Assistant of the Department «Electric Rolling Stock», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kostyans7kss@gmail.com.

Oleg Valeryevich Melnichenko – Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department «Electric Rolling Stock», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olegmelnval@mail.ru.

Vladimir Nikolayevich Ivanov – Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department «Electric Rolling Stock», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: v.n.ivanov40161@yandex.ru.

Для цитирования

Портной А. Ю. Математическое моделирование механических напряжений, возникающих при неравномерном нагреве остова тягового электродвигателя НБ-514 [Электронный ресурс] / А. Ю. Портной, К. П. Селедцов, О. В. Мельниченко, В. Н. Иванов // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021.

For citation

Portnoy A. Y., Seledtsov K. P., Melnichenko O. V., Ivanov V. N. *Matematicheskoye modelirovaniye mekhanicheskikh napryazheniy. voznikayushchikh pri neravno-mernom nagreve ostova tyagovogo elektrodvigatelya NB-514* [Mathematical simulation of mechanical stresses arising at uneven heating of the traction electric motor NB-514]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021.