

## Оценка влияния системы охлаждения электровоза и параметров движения поезда на трещинообразование в остовах тягового электродвигателя НБ-514

А.Ю. Портной, К.П. Селедцов✉, О.В. Мельниченко, М.В. Мищенко

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉kostyans7kss@gmail.com

### Резюме

Целью данной работы является выявление причин возникновения трещин в остовах тяговых электродвигателей современных отечественных электровозов. Приведен анализ статистики выявления трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 на Восточном полигоне, показывающий, что практически каждый третий остов данного тягового электродвигателя в эксплуатации имеет трещины, при этом основная доля выявленных трещин приходится на электровозы серий 2,3,4ЭС5К. Проведено математическое моделирование на электронно-вычислительной машине с применением метода конечных элементов. Рассмотрены результаты математического моделирования механических напряжений, возникающих в остовах тягового электродвигателя НБ-514 при его неравномерном нагреве до температур, характерных для часового режима работы тягового электродвигателя. Выявлено, что механические напряжения, возникающие только из-за разности температур окружающего воздуха и обмоток главных и дополнительных полюсов тягового электродвигателя, могут достигать механических напряжений свыше 100 МПа, что превышает предел выносливости стали остова. Выполнены математические расчеты возникающих механических напряжений в остовах тягового электродвигателя в зависимости от его нагрева при эксплуатации на горно-перевальном участке Большой Луг – Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги». Сделан вывод, что одной из основных причин трещинообразования в остовах тяговых электродвигателей является наличие температурных напряжений, вызванных воздействием малоциклового усталости из-за нагрева двигателя при снижении расхода воздуха на охлаждение тягового электродвигателя. Для уменьшения трещинообразования в остовах тягового электродвигателя НБ-514 предлагается либо увеличить расхода воздуха системой вентиляции, либо изменить формы вентиляционного и смотрового окон остова данного тягового электродвигателя.

### Ключевые слова

тяговый электродвигатель, механические напряжения, трещинообразование, нагрев электродвигателя, математическое моделирование, тяга поездов

### Для цитирования

Оценка влияния системы охлаждения электровоза и параметров движения поезда на трещинообразование в остовах тягового электродвигателя НБ-514 / А.Ю. Портной, К.П. Селедцов, О.В. Мельниченко, М.В. Мищенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 101–111. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).101-111.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 19.04.2022 г.; поступила после рецензирования: 10.06.2022 г.; принята к публикации: 14.06.2022 г.

## Evaluation of the influence of the cooling system of an electric locomotive and the parameters of train movement on cracking in the frame of the NB-514 traction motor

A.Yu. Portnoi, K.P. Seledtsov✉, O.V. Melnichenko, M.V. Mishchenkov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉kostyans7kss@gmail.com

### Abstract

The purpose of this work is to identify the causes of cracks in the frames of traction electric motors of modern domestic electric locomotives. An analysis of the statistics of detection of cracks in the frames of NB-514 traction motors at the Eastern range is given, showing that almost every third frame of this traction motor in operation has cracks, while the main share of the identified cracks falls on electric locomotives of the 2,3,4ES5K series. The results of mathematical modeling of mechanical stresses arising in the frame of the NB-514 traction motor during its uneven heating to temperatures typical for the hourly operation of the traction motor are considered. It was revealed that mechanical stresses arising only from the temperature difference between the ambient air and the windings of the main and additional poles of the traction motor can reach mechanical stresses over 100 MPa, which exceeds the endurance limit of the frame steel. Mathematical calculations of the arising mechanical stresses in the frame of

the traction electric motor are performed depending on its heating during operation at the mountain pass section Bolshoi Lug – Slyudyanka of the East Siberian Railway – a branch of Russian Railways. It is concluded that one of the main causes of cracking in the frames of traction motors is the presence of thermal stresses caused by low-cycle fatigue due to engine heating with a decrease in air consumption for cooling the traction motor. To reduce cracking in the frame of the NB-514 traction motor, it is proposed either to increase the air flow by the ventilation system, or to change the shape of the ventilation and viewing windows of the frame of this traction motor.

### Keywords

traction motor, mechanical stresses, cracking, electric motor heating, mathematical modeling, train traction

### For citation

Portnoi A.Yu., Seledtsov K.P., Mel'nichenko O.V., Mishchenkov M.V. Otsenka vliyaniya sistemy okhlazhdeniya elektrovoza i parametrov dvizheniya poyezda na treshchinoobrazovaniye v ostove tyagovogo elektrodvigatelya NB-514 [Evaluation of the influence of the cooling system of an electric locomotive and the parameters of train movement on cracking in the frame of the NB-514 traction motor]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 101–111. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).101-111.

### Article info

Received: April 19, 2022; revised: June 10, 2022; accepted: June 14, 2022.

### Введение

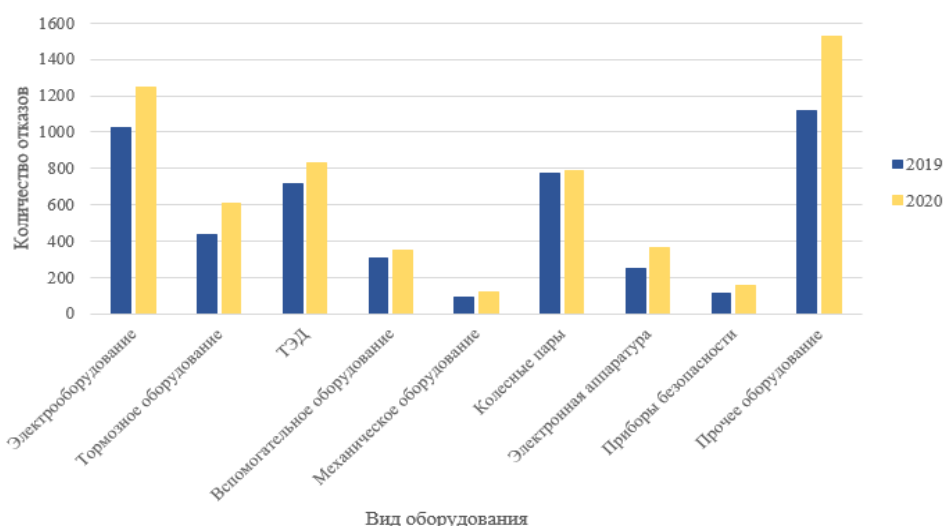
Сегодня одна из приоритетных задач на железнодорожном транспорте – увеличение весовых норм перевозимых грузов, погонных и весовых нагрузок подвижного состава. При этом должен меняться технический уровень электроподвижного состава для соответствия новым требованиям.

В работе рассматривается влияние системы охлаждения электровоза и массы поезда на нагрев тягового электродвигателя НБ-514 электровоза с последующим трещинообразованием в его остове. Увеличение массы поезда порождает ряд проблем по части взаимодействия колеса и рельса, например, усиленный износ по-

верхности катания колес и рельсов, угон пути, возникновение дополнительного воздействия на путь при изменении продольных сил в поезде и др. [1–3]. При возрастании массы состава электровозу приходится работать на больших значениях силы тяги, которые достигают предельных значений по сцеплению. Это приводит к росту силы тока в тяговых электродвигателях электровоза и увеличению нагрева их обмоток.

### Статистические данные

Тяговый электродвигатель – один из основных повреждаемых узлов электровоза. На рис. 1 представлены данные ООО «ЛокоТех» о статистике отказов оборудования электровозов в



**Рис. 1.** Статистика отказов оборудования электровозов в сервисных локомотивных депо Братское, Северобайкальск, Нижнеудинск и Иркутское за 2019–2020 гг.

**Fig.1.** Equipment failure statistics for electric locomotives in the servicing locomotive depots of Bratskoe, Severobaikalsk, Nizhneudinsk and Irkutskoe in 2019–2020

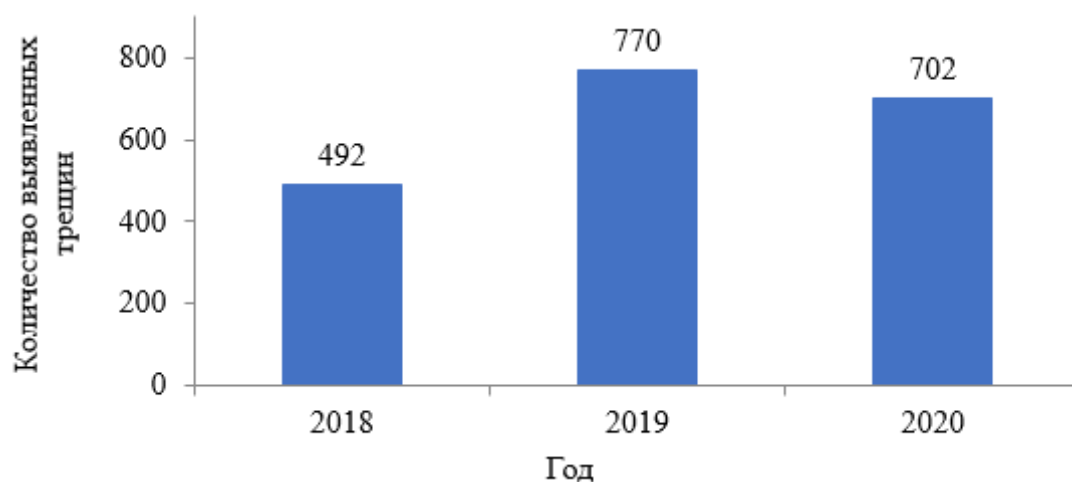
сервисных локомотивных депо (СЛД) Братское, Северобайкальск, Нижнеудинск и Иркутское за 2019–2020 гг.

К неисправностям тяговых электродвигателей относят: образование трещин в остове, повреждения моторно-якорных подшипников, якоря, полюсов, компенсационной обмотки и др. На рис. 2 показана статистика выявления трещин в остовах тяговых электродвигателей электровозов серий ВЛ80С, Р, ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К на Восточном полигоне.

По статистическим данным практически

каждый третий остов тягового электродвигателя НБ-514, находящийся в эксплуатации, имеет трещины (рис. 3, а).

Образование трещин в остовах разных типов тяговых электродвигателей происходит в одном и том же месте (рис. 3, б). Данные трещины возникают вблизи смотрового и вентиляционного окон с коллекторной стороны двигателя, что приведет к ускоренному выходу из строя двигателя и потребует постановки электровоза на непланный ремонт и вызовет значительные затраты и издержки.

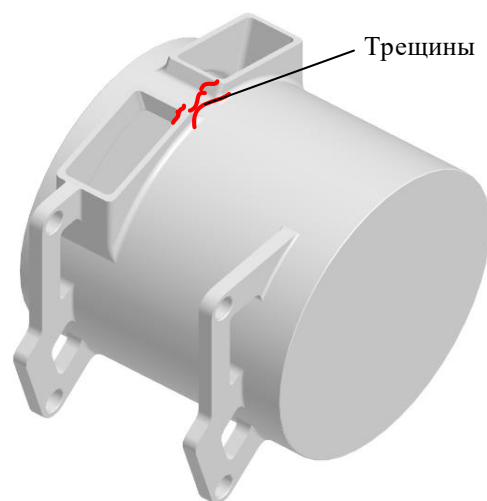


**Рис. 2.** Статистика выявления трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 электровозов серий ВЛ80С, Р, ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К на Восточном полигоне за 2018–2020 гг.

**Fig. 2.** Crack detection statistics in traction NB-514 electric motor frames of the electric locomotives of BL80S, RBL85 and 2,3,4 TS5K series at the Eastern range in 2018-2020



а



б

**Рис. 3.** Трещины в остове тягового электродвигателя НБ-514:

а – фотография возникающих трещин; б – схема расположения трещин на упрощенной модели

**Fig. 3.** Cracks in the frame of the traction electric motor NB-514:

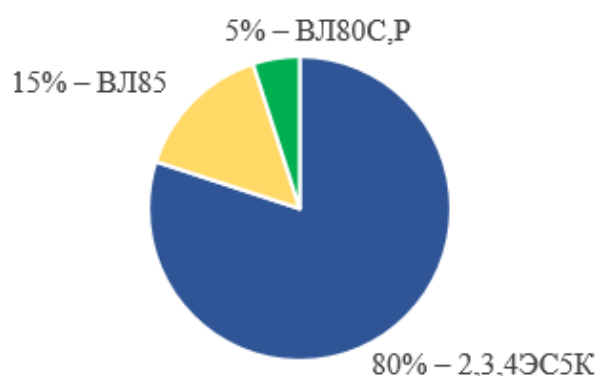
а – photo of the emerging cracs; б – crack location scheme on the simplified model

Выявленные в остовах тяговых электродвигателей трещины заваривают после выкатки колесно-моторного блока при проведении текущего ремонта в объеме ТР-1. При этом, например, в СЛД Иркутское, на ТР-1 практически каждый тяговый электродвигатель электровоза «Ермак», работающего в режиме подталкивания на горно-перевальном участке Большой Луг – Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», имеет трещины в остовах (см. рис. 3).

На рис. 4 показано процентное соотношение выявленных трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 для электровозов

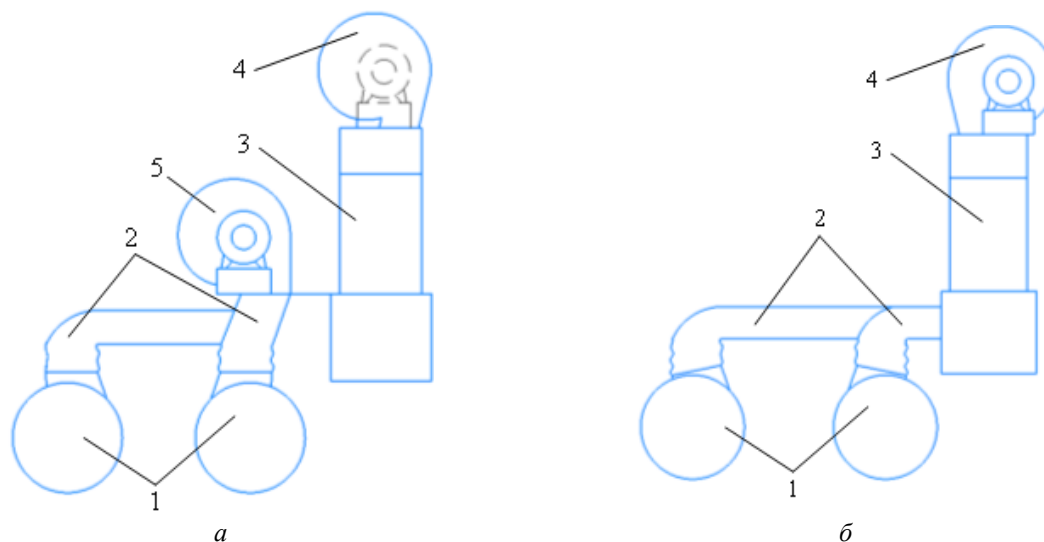
серий ВЛ80С, Р, ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К на Восточном полигоне.

Из рис. 4 видно, что основная доля трещин (80 %) в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 приходится на современные отечественные электровозы серий 2,3,4ЭС5К. Такой значительный отрыв по трещинам в остовах натолкнул авторов на мысль сравнить количество расхода охлаждающего воздуха на тяговые электродвигатели по сериям электровозов переменного тока, так как значение температуры нагрева остова тягового электродвигателя напрямую влияет на величину механических напряжений в нем.



**Рис. 4.** Доля выявленных трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514, принадлежащая на разные серии электровозов

**Fig. 4.** Proportion of detected cracks in the frames of traction electric motors NB-514 for electric locomotives of different series



**Рис. 5.** Система принудительной вентиляции на электровозах:

*a* – серий ВЛ80С, Р; *б* – серий ВЛ85, 2,3,4ЭС5К

(1 – тяговые электродвигатели; 2 – воздуховоды к двигателям; 3 – выпрямительно-инверторный преобразователь; 4, 5 – центробежные вентиляторы)

**Fig. 5.** Forced ventilation system in electric locomotives: *a* – VL80S,R series; *b* – BL85,3,4ES5K series (1 – traction electric motors; 2 – motor air ducts; 3 – rectifying-inverter converter; 4,5-centrifugal fans)

Для охлаждения тяговых электродвигателей на рассматриваемых электровозах установлена система принудительной вентиляции (рис. 5), которая обеспечивает пропускание необходимого объема воздуха согласно техническим требованиям.

На электровозах серий ВЛ80С и ВЛ80Р охлаждение тяговых электродвигателей и выпрямительно-инверторного преобразователя осуществляется раздельно [4, 5]. На электровозах серий ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К охлаждающий воздух от центробежного вентилятора охлаждает сначала выпрямительно-инверторный преобразователь, а затем поступает к тяговым электродвигателям [6, 7].

В настоящее время тяговый электродвигатель НБ-514 устанавливается на электровозах серий ВЛ80С, ВЛ80Р модификации НБ-514Б взамен НБ-418К6 [8], серий ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К модификации НБ-514Б [6, 7] и серии 3ЭС5К модификации НБ-514Е [9]. В табл. 1 указан расход воздуха системой вентиляции на охлаждение каждого тягового электродвигателя по сериям электровозов.

**Таблица 1.** Расход воздуха системой вентиляции на каждый тяговый электродвигатель по сериям электровозов

**Table 1.** Ventilation system air flow for electric locomotive series

Серия электровоза Locomotive series	Расход воздуха на тяговом электродвигателе, не менее м <sup>3</sup> /мин. Air flow on traction electric motor, at least m <sup>3</sup> /min.
ВЛ80С, ВЛ80Р	105
ВЛ85	95
2ЭС5К; 3ЭС5К; 4ЭС5К	70

Из табл. 1 видно, что расход воздуха системой вентиляции на тяговые электродвигатели электровозов серий 2,3,4ЭС5К значительно ниже (на 30 %), чем на других сериях электровозов (ВЛ80С, Р и ВЛ85), что обусловлено, скорее всего, желанием уменьшить расход электроэнергии на собственные нужды электровоза.

Таким образом, снижение расхода воздуха на охлаждение тяговых электродвигателей неизбежно приводит к росту температуры их обмоток, градиента температур, в связи с чем могут возникать недопустимые механические напряжения в остовах тяговых электродвигате-

лей, постепенно приводящие к трещинообразованию.

### Оценка градиента температуры и возникающих механических напряжений

Согласно ГОСТ 23207-78 [10] процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению, называется усталостью материала. Малоцикловая усталость – усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упругопластическом деформировании. Практикой установлено [11], что если элемент конструкции многократно подвергать переменному нагружению определенного уровня, то после некоторого числа перемен напряжений в нем появится трещина, которая постепенно будет развиваться. В итоге деталь разрушится, не дав при этом заметных остаточных деформаций даже в том случае, когда ее материал высокопластичен.

Свойство материала противостоять усталости называют сопротивлением усталости или выносливостью [10]. Имея величину временного сопротивления разрыву (предел прочности)  $\sigma_b$ , пределы выносливости стали при симметричном цикле можно приблизительно найти по следующим эмпирическим соотношениям [11]: для растяжения – сжатия –  $\sigma_{-1}^{\circ} = 0,28\sigma_b$ , для изгиба –  $\sigma_{-1}^I = 0,4\sigma_b$ , для кручения –  $\tau_{-1} = 0,22\sigma_b$ . Поскольку напряжения сдвига отличаются от напряжений кручения только выбором системы отсчета, можно предположить, что предел выносливости при сдвиге будет примерно тем же, что и при кручении –  $\sigma_{-1}^{сдв} \approx 0,22\sigma_b$ .

Изучение возникающих напряжений в остове тягового электродвигателя разделяется на две задачи – изучение температурного распределения в остове, которое появляется при его нагреве, и изучение механических напряжений, возникающих вследствие тепловых деформаций [12].

Для выявления причин образования трещин была создана упрощенная 3D модель остова тягового электродвигателя НБ-514 (рис. 6). С помощью программного комплекса Femap был проведен тепловой расчет данного остова, а затем прочностной расчет, при котором нагруз-

кой на остов служили рассчитанные ранее значения температуры. При расчетах материалу модели остова тягового электродвигателя были заданы свойства стали марки 25Л, используемой при изготовлении деталей тяговых электродвигателей НБ-514 [7]. Точки закрепления остова стандартные для опорно-осевого подвешивания тягового электродвигателя НБ-514 [7].

Для проведения теплового расчета задана температурная модель нагрева остова тягового

электродвигателя НБ-514 (рис. 7). В зоне расположения обмотки возбуждения двигателя температура задана 180°C и 40°C – в зоне смотрового и вентиляционного окон, что имитирует температуру охлаждающего воздуха системы вентиляции. Температура 180°C выбрана характерной для часового режима работы тягового электродвигателя. Полученная температурная модель является подходящей для решаемой задачи, в которой анализируются механические

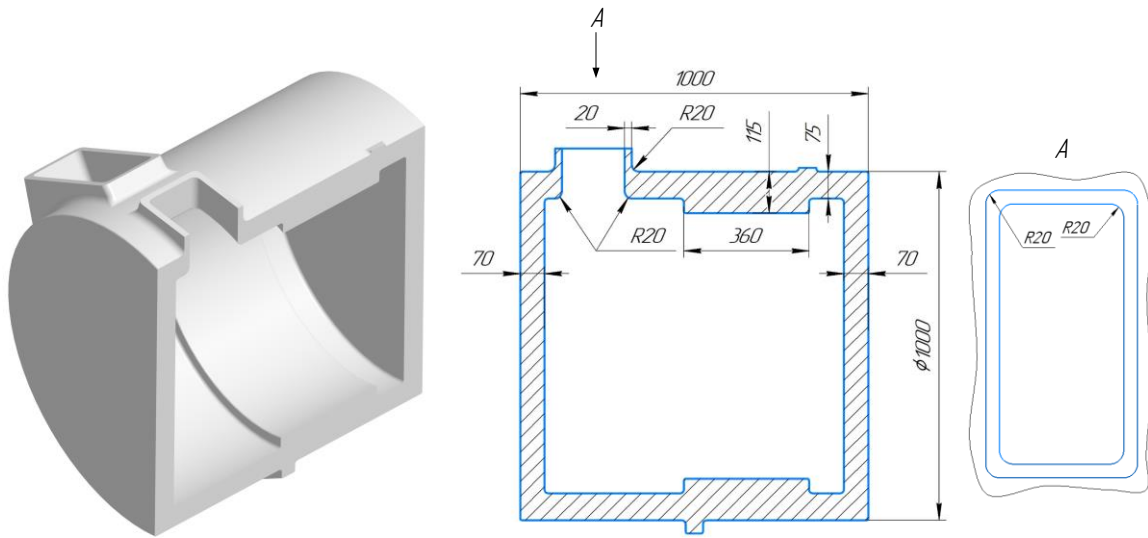


Рис. 6. Упрощенная модель остова тягового электродвигателя НБ-514

Fig. 6. Simplified model of the frame of traction electric motor NB-514

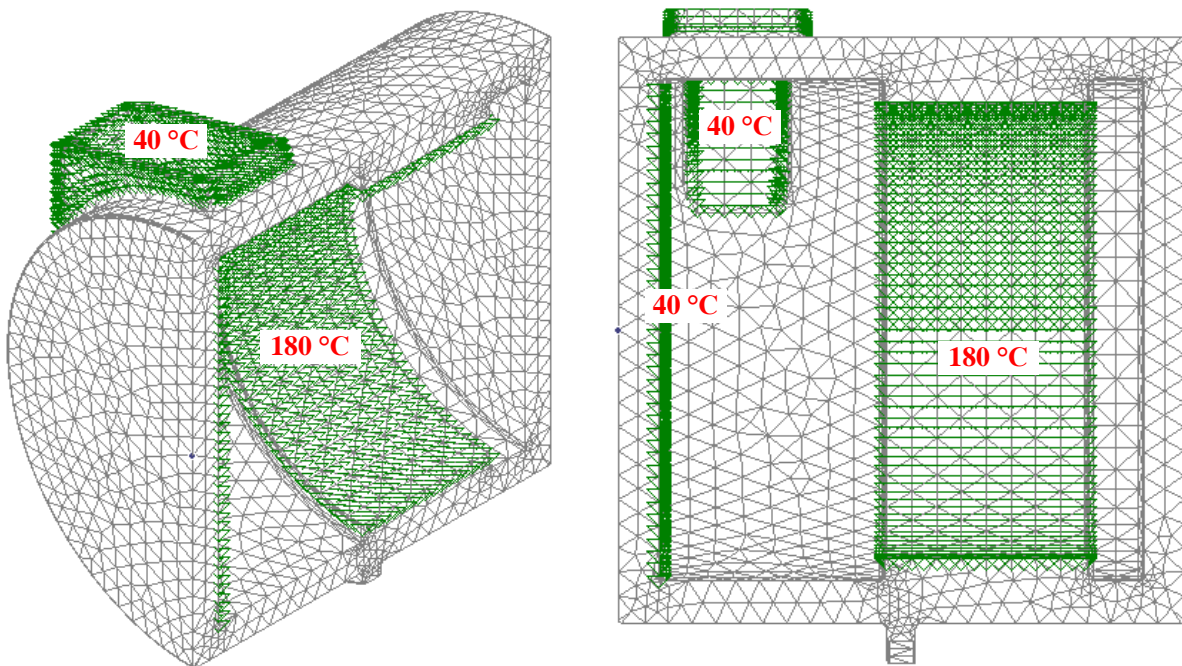


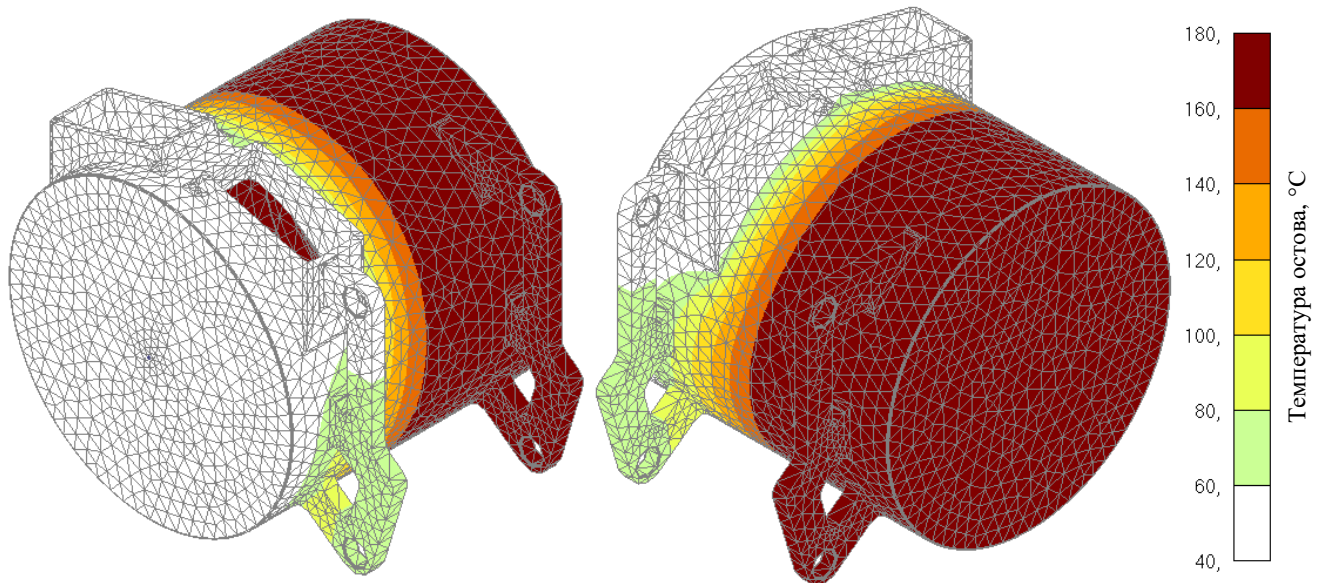
Рис. 7. Заданная температура нагрева остова тягового электродвигателя НБ-514

Fig. 7. Set heating temperature for the frame of NB-514 traction electric motor

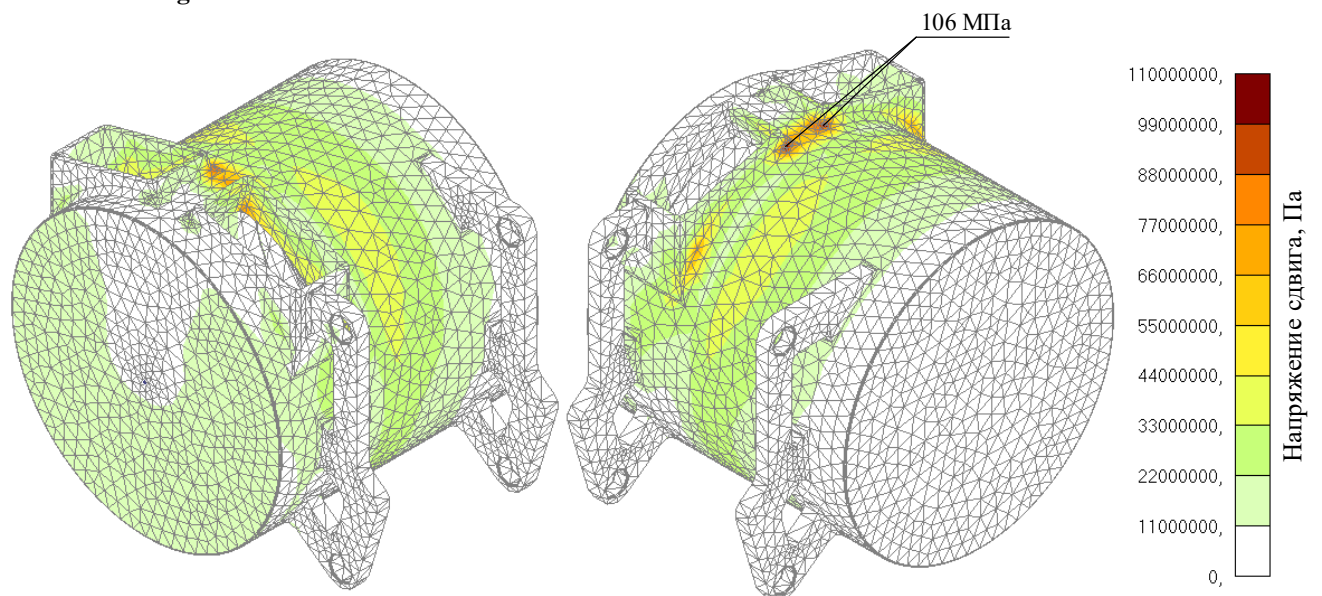
напряжения, возникающие в зоне между вентиляционным и смотровым окнами двигателя вдали от обмоток полюсов. Результаты теплового расчета для превышения температуры обмоток на  $140^{\circ}\text{C}$  представлены на рис. 8.

Следовательно, одной из основных причин образования трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 можно считать циклически повторяющиеся температурные напряжения, возникающие из-за неравномерности

распределения температуры. Особенно характерно это для часового режима работы электровоза как в режиме тяги, так и в режиме рекуперативного торможения. Особое значение подобные напряжения имеют для электровозов, постоянно работающих на горно-перевальных участках в качестве электровозов подталкивания [13]. Проведение измерений в зоне возникновения трещин тензометрическим методом практически невозможно из-за геометрии остова.



**Рис. 8.** Результаты теплового расчета остова тягового электродвигателя НБ-514  
**Fig. 8.** Results of thermal calculation for the frame of NB-514 traction electric motor



**Рис. 9.** Результаты прочностного расчета остова тягового электродвигателя НБ-514  
**Fig. 9.** Results of strength calculation for the frame of NB-514 traction electric motor

**Исследование нагрева двигателя на горно-перевальном участке Большой Луг – Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги» в программном комплексе «Кортэс»**

Для математического моделирования зависимости механических напряжений в остовах тягового электродвигателя от его нагрева при движении поезда были проведены тяговые расчеты в программном комплексе «Кортэс» [14]. Профиль пути при расчетах соответствует горно-перевальному участку Большой Луг – Слюдянка, спрямление пути не производилось, кривые учтены в качестве фиктивного подъема [15].

Расчеты проводились для двух серий электровозов – 1,5ВЛ80Р и 3ЭС5К. Параметры тяговых электродвигателей были заданы согласно правилам технических расчетов [15]. Согласно тепловым характеристикам тягового электродвигателя НБ-514, его постоянная времени  $T$  при различных значениях тока двигателя неизменна, что свидетельствует о том, что вентиляторы системы охлаждения при расчете считаются всегда включенными, в том числе в режиме выбега, что не всегда выполняется на практике.

Основной расчет выполнялся для поезда массой 3 400 т, являющейся критической нормой массы поезда для электровозов 1,5ВЛ80Р и 3ЭС5К на участке Иркутск-Сортировочный – Петровский Завод в четном направлении [16] при максимальной допустимой скорости

55 км/ч, которая характерна на горно-перевальных участках с дефектами рельсов типов 40 (волнообразный износ и смятие головки рельса) и 44 (боковой износ головки рельса) [17]. Меньшие и большие веса поезда приняты для справки.

В табл. 2 представлены результаты моделирования, показывающие зависимость превышения температуры обмоток тягового электродвигателя относительно охлаждающего воздуха системы вентиляции от массы поезда. Кроме того, к температуре нагрева двигателя электровозов серии 3ЭС5К относительно окружающей среды следует прибавить примерно 20 °С из-за увеличения температуры воздуха после охлаждения тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя. Рассчитанные ранее значения механических напряжений в остовах тягового электродвигателя НБ-514 при превышении температуры обмоток относительно охлаждающего воздуха системы вентиляции на 140 °С позволяют определить напряжения в данном остовах при других превышениях температуры обмоток. Соответствующие значения механических напряжений также представлены в табл. 2.

Из представленных данных (см. табл. 2), видно, что остов тягового электродвигателя НБ-514 электровозов серии 2,3,4ЭС5К, согласно расчетам, имеет в среднем на 20 % большие механические напряжения, возникающие при его нагреве, по сравнению с электровозами серии ВЛ80Р. При этом создающиеся механические напряже-

**Таблица 2.** Зависимости превышения температуры обмоток двигателя и механических напряжений в остовах тягового электродвигателя НБ-514 от массы поезда

**Table 2.** Dependences of temperature excess in motor windings and mechanical stresses in the frame of NB-514 electric motor on the train mass

Масса поезда, т	Превышение температуры обмоток двигателя относительно охлаждающего воздуха системы вентиляции, °С		Превышение температуры обмоток двигателя электровоза 3ЭС5К относительно окружающей среды, °С	Напряжения сдвига в остовах тягового электродвигателя $\sigma$ , МПа (доля $\sigma_B$ )	
	1,5ВЛ80Р	3ЭС5К		1,5ВЛ80Р	3ЭС5К
3000	71	85	103	54 (0,14 $\sigma_B$ )	64 (0,16 $\sigma_B$ )
3200	76	90	109	57 (0,14 $\sigma_B$ )	68 (0,17 $\sigma_B$ )
<b>3400</b>	<b>81</b>	<b>95</b>	<b>115</b>	<b>61 (0,15<math>\sigma_B</math>)</b>	<b>72 (0,18<math>\sigma_B</math>)</b>
3600	86	103	124	65 (0,16 $\sigma_B$ )	78 (0,2 $\sigma_B$ )
3800	92	113	135	70 (0,18 $\sigma_B$ )	85 (0,21 $\sigma_B$ )
4000	99	127	151	75 (0,19 $\sigma_B$ )	96 (0,24 $\sigma_B$ )
4200	109	146	173	82 (0,21 $\sigma_B$ )	110 (0,28 $\sigma_B$ )
4400	124	185	215	94 (0,24 $\sigma_B$ )	140 (0,35 $\sigma_B$ )



ния пропорциональны превышению температуры обмоток относительно охлаждающего воздуха системы вентиляции и также пропорциональны квадрату массы поезда, т. е. при увеличении массы поезда они значительно возрастают, что также приводит к трещинообразованию.

В данных расчетах учитывались только температурные напряжения в остовах тягового электродвигателя, но не учитывались напряжения, возникающие при механической работе двигателя, а также вибрации, появляющиеся при взаимодействии колеса и рельса. При этом стоит отметить, что жесткость рельсового пути, начиная с 2001 и по 2012 гг. выросла до четырех раз в летнее время года и до пяти раз в зимнее время года [18], что обусловлено переходом с деревянных шпал на железобетонные. В этом случае возросшие вибрации при взаимодействии колеса и рельса являются еще одной причиной трещинообразования в остовах тяговых электродвигателей современных отечественных электровозов.

Величина только температурных напряжений превышает предел выносливости стали остова тягового электродвигателя, что подтверждает основную причину и объем (80 %) трещинообразования остовов тяговых электродвигателей электровозов серий 2,3,4ЭС5К по сравнению с другими сериями. Таким образом, возникающие температурные напряжения необходимо значительно уменьшать, что возможно путем улучшения системы принудительной вентиляции двигателей и за счет изменения геометрической формы вентиляционного и смотрового окон остова тягового электродвигателя [12, 13].

## Заключение

В настоящее время существует проблема значительного количества трещинообразования в остовах тяговых электродвигателей современных отечественных электровозов. Практически каждый третий остов электродвигателя электровоза в эксплуатации имеет трещинообразование.

Большую часть отказов (80 %) остовов электродвигателей имеют электровозы серии 2,3,4ЭС5К.

Выявлено, что расход воздуха системой вентиляции на тяговые электродвигатели электровозов серий 2,3,4ЭС5К значительно ниже ( $70 \text{ м}^3/\text{мин}$ ), чем на других сериях электровозов – ВЛ80С, Р и ВЛ85 (соответственно  $105$  и  $95 \text{ м}^3/\text{мин}$ ).

Выполнено моделирование в программном комплексе Femap, что позволило установить одну из основных причин трещинообразования в остовах тяговых электродвигателей – наличие температурных напряжений ( $106 \text{ МПа}$ ), вызванных воздействием малоциклового усталости стали остова тягового электродвигателя, и превышающих предел выносливости стали.

Результаты моделирования показали зависимость величины механических напряжений в остовах тягового электродвигателя НБ-514 от массы поезда. Выявлено, что остов тягового электродвигателя электровозов серии 3ЭС5К имеет примерно на 20 % большие механические напряжения, возникающие из-за перегрева, по сравнению с электровозами серии 1,5ВЛ80Р.

Дополнительные значения напряжений в остовах тяговых электродвигателей образуются и от вибраций при механической работе тягового электродвигателя и при взаимодействии колеса и рельсового пути. Жесткость рельсового пути значительно выросла из-за перехода с деревянных шпал на железобетонные. Это позволило сформулировать еще одну причину трещинообразования в остовах тяговых электродвигателей современных отечественных электровозов.

Для уменьшения трещинообразования в остовах тягового электродвигателя НБ-514 авторами предлагается либо увеличить расход воздуха системой вентиляции, либо изменить формы вентиляционного и смотрового окон остова данного двигателя.

С целью подтверждения основных причин трещинообразования требуется проведение эксплуатационных испытаний электровоза с замером температуры нагрева остова тягового электродвигателя и возникающих в нем вибраций, вызывающих недопустимые механические напряжения.

## Список литературы

1. Зябиров Х.Ш. Система «колесо-рельс»: оптимальное взаимодействие // Евразия Вести : электрон. газета. 2004. № 4. URL: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2004-06a01> (дата обращения: 20.01.2022).

2. Киселев М.Д. Автоматическое управление скоростью грузового поезда при использовании распределенной тяги : дис. ... канд. техн. наук. М. : МИИТ, 2019. 205 с.
3. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У.Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландарен. М. : Интекст, 2002. 408 с.
4. Электровоз ВЛ80С : руководство по эксплуатации / Н.М. Васько, Н.П. Козельский, А.А. Матлахов и др. М. : Транспорт, 1982. 622 с.
5. Электровоз ВЛ80Р : руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.М. Васько, В.И. Покромкин и др. М. : Транспорт, 1985. 541 с.
6. Электровоз ВЛ85 : руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.Г. Пушкарев, Л.А. Позднжова и др. М. : Транспорт, 1992. 480 с.
7. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К) : руководство по эксплуатации : в 2 т. Новочеркасск, 2007. 2 т.
8. Каталог электродвигателей // Новочеркасский электровозостроительный завод : сайт. URL: <https://nevz.com/catalogue/catalogue.pdf> (дата обращения: 21.01.2022).
9. Улан-Удэнский ЛВРЗ в 2018 году освоил выпуск новой продукции // ЛокоТех : сайт. URL: <https://www.locotech.ru/press-center/news/2724/> (дата обращения: 21.01.2022).
10. ГОСТ 23207-78. Сопrotivление усталости. Основные термины, определения и обозначения. Введ. 1979–01–01. М. : Изд-во стандартов, 1981. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009488> (дата обращения: 28.01.2022).
11. Писаренко Г.С. Сопrotivление материалов. Киев : Вища школа, 1979. 696 с.
12. Портной А.Ю., Селедцов К.П., Мельниченко О.В. Математическое моделирование механических напряжений, возникающих при неравномерном нагреве остова тягового электродвигателя НБ-514 и совершенствование его конструкции // Изв. Транссиба. 2021. № 2 (46). С. 13–23.
13. Математическое моделирование механических напряжений, возникающих при неравномерном нагреве остова тягового электродвигателя НБ-514 / А.Ю. Портной, К.П. Селедцов, О.В. Мельниченко и др. // Молодая наука Сибири : электрон. науч. журн. 2021. № 1 (11). URL: <https://mnv.irkgups.ru/matematiceskoe-modelirovanie-mehaniceskikh-napryazheniy-voznikayushchih-pri-neravnomernom-nagreve> (дата обращения: 22.02.2022).
14. Программное обеспечение, подготовка данных для тяговых и электрических расчетов // Studbooks.net : сайт. URL: [https://studbooks.net/1941590/matematika\\_himiya\\_fizika/programmnoe\\_obespechenie\\_podgotovka\\_dannyh\\_tyagovyh\\_elektricheskikh\\_raschetov](https://studbooks.net/1941590/matematika_himiya_fizika/programmnoe_obespechenie_podgotovka_dannyh_tyagovyh_elektricheskikh_raschetov) (дата обращения: 01.02.2022).
15. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» 867р от 12.05.2016 : в ред. от 02.02.2018. М. : ОАО «РЖД», 2016. 515 с.
16. Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Восточно-Сибирской дирекцией тяги : приказ Дирекции тяги от 02.12.2020 № ЦТ-224. URL: <ftp://09272071.com/docs/%D0%A6%D0%A2-224.pdf> (дата обращения: 01.02.2022).
17. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов : инструкция утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 № 2499р. URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/144> (дата обращения: 17.01.2022).
18. Певзнер В.О., Косарев А.Б. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности. М. : ВНИИЖТ, 2016. 97 с.

### References

1. Zyabirov Kh.Sh. Sistema «koleso-rel's»: optimal'noe vzaimodeistvie (Elektronnyi resurs) [Wheel-rail system: optimal interaction (Electronic resource)]. Available at: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2004-06a01> (Accessed January 20, 2022).
2. Kiselev M.D. Avtomaticheskoe upravlenie skorost'yu gruzovogo poyezda pri ispolzovanii raspredelennoi tyagi [Automatic speed control of a freight train using distributed traction]. PhD's thesis. Moscow, 2019. 205 p.
3. Harris U.J., Zaharov S.M., Landaren J., Torne H., Ebersen V. Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeistviya kolesa i rel'sa [Summarized Best Practices of Heavy Traffic: Issues of Wheel-Rail Interaction]. Moscow: Intekst Publ., 2002. 408 p.
4. Vasko N.M., Kozel'skii N.P., Matlakhov A.A. et al. Elektrovoz VL80S. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL80S. Manual]. Moscow: Transport Publ., 1982. 622 p.
5. Tushkanov B.A., Vasko N.M., Pokromkin V.I. et al. Elektrovoz VL80R. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL80R. Manual]. Moscow: Transport Publ., 1985. 541 p.
6. Tushkanov B.A., Pushkarev N.G., Pozdnzhova L.A. et al. Elektrovoz VL85. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL85. Manual]. Moscow: Transport Publ., 1992. 480 p.
7. Elektrovoz magistralnyi 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Manual]. Novocherkassk, 2007. Vol. 1. 635 p. Vol. 2. 640 p.
8. Katalog elektrodvigateli (Elektronnyi resurs) [Catalog of electric motors (Electronic resource)]. Available at: <https://nevz.com/catalogue/catalogue.pdf> (Accessed January 21, 2022).
9. Ulan-Udenskii LVRZ v 2018 godu osvoil vypusk novoi produktsii (Elektronnyi resurs) [Ulan-Ude LVRZ mastered the production of new products in 2018 (Electronic resource)]. Available at: <https://www.locotech.ru/press-center/news/2724/> (Accessed January 21, 2022).
10. GOST 23207-78. Soprotivlenie ustalosti. Osnovnye terminy, opredeleniya i oboznacheniya (Elektronnyi resurs) [State Standard 23207-78. Fatigue strength. Terms, definitions and symbols (Electronic resource)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200009488> (Accessed January 28, 2022).

11. Pisarenko G.S. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Kiev: Vysshaya shkola Publ., 1979. 696 p.
12. Portnoy A. Y., Seledtsov K. P., Melnichenko O. V. Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskikh napryazhenii, voznikayushchikh pri neravnomernom nagreve ostova tyagovogo elektrodvigatelya NB-514 i sovershenstvovanie ego konstruktivnykh [Mathematical simulation of mechanical stresses arising at uneven heating of the traction electric motor NB-514 and improvement of its design]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2021, no. 2(46), pp. 13–23.
13. Portnoi A.Yu., Seledtsov K.P., Mel'nichenko O.V., Ivanov V.N. Matematicheskoye modelirovaniye mekhanicheskikh napryazhenii, voznikayushchikh pri neravnomernom 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: elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal]. 2021, no. 1(11). Available at: <https://mnv.irkups.ru/matematicheskoe-modelirovanie-mekhanicheskikh-napryazheniy-voznikayushchih-pri-neravnomernom-nagreve> (Accessed February 22, 2022).
14. Programmnoye obespecheniye, podgotovka dannykh dlya tyagovykh i elektricheskikh raschetov (Elektronnyi resurs) [Software, data preparation for traction and electrical calculations (Electronic resource)]. Available at: [https://studbooks.net/1941590/matematika\\_himiya\\_fizika/programmnoye\\_obespechenie\\_podgotovka\\_dannyh\\_tyagovykh\\_elektricheskikh\\_raschetov](https://studbooks.net/1941590/matematika_himiya_fizika/programmnoye_obespechenie_podgotovka_dannyh_tyagovykh_elektricheskikh_raschetov) (Accessed February 1, 2022).
15. Rasporyazhenie OAO «RZhD» 867r ot 12.05.2016 (red. 02.02.2018) «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» [Order of JSC «Russian Railways» 867r dated 12.05.2016 (ed. 02.02.2018) «On approval of the rules of traction calculations for train work»]. Moscow: RZhD Publ., 2016. 515 p.
16. Prikaz Direktsii tyagi ot 02.12.2020 № TsT-224 «Ob ustanovlenii norm mass i dlin passazhirskikh i gruzovykh poezdov na uchastkakh. obsluzhivayemykh Vostochno-Sibirskoi direktsiei tyagi» (Elektronnyi resurs) [Order of the Traction Directorate dated December 2, 2020 no TsT-224 «On the establishment of norms for the masses and lengths of passenger and freight trains on sections served by the East Siberian Traction Directorate» (Electronic resource)]. Available at: <ftp://09272071.com/docs/%D0%A6%D0%A2-224.pdf> (accessed February 1, 2022).
17. Instruktsiya «Defekty relsov. Klassifikatsiya. katalog i parametry defektnykh i ostrodefektnykh relsov». utverzhennaya rasporyazheniyem OAO «RZhD» ot 23.10.2014 № 2499r (Elektronnyi resurs) [Instruction «Rail Defects. Classification, catalog and parameters of defective and sharply defective rails», approved by order of Russian Railways OJSC dated October 23, 2014 no 2499r (Electronic resource)]. Available at: <https://www.tdesant.ru/info/item/144> (Accessed January 17, 2022).
18. Pevzner V.O., Kosarev A.B. Metodika otsenki vozdeistviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti [Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track according to the conditions for ensuring reliability]. Moscow: VNIIZHT Publ., 2016. 97 p.

### Информация об авторах

**Портной Александр Юрьевич**, д-р физ. - мат. наук, доцент, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: portnoy\_alexander@mail.ru.

**Сеledgeв Константин Павлович**, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kostyans7kss@gmail.com.

**Мельниченко Олег Валерьевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Мищенко Максим Вальдемарович**, аспирант кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: reydersp@mail.ru.

### Information about the authors

**Alexander Yu. Portnoi**, Doctor of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: portnoy\_alexander@mail.ru.

**Konstantin P. Seledtsov**, Ph.D. student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kostyans7kss@gmail.com.

**Oleg V. Mel'nichenko**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Maksim V. Mishchenkov**, Ph.D. student of the Department of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: reydersp@mail.ru.