УДК 629.4.01

В. И. Грек, канд. техн. наук

В. И. Сафонов, докт. техн. наук

Федеральное бюджетное учреждение «Регистр сертификации на федеральном железнодорожном транспорте»

ОДНО КРИТИЧЕСКОЕ ЗАМЕЧАНИЕ К ИСПЫТАНИЯМ БУКСОВЫХ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СКОРОСТНОГО И ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СОСТАВА

Выпуск в обращение железнодорожного подвижного состава и его комплектующих на территории Таможенного союза допускается только после подтверждения соответствия требованиям безопасности, установленных техническими регламентами ТР ТС 001/2011 и ТР ТС 002/2011. Когда речь идет о таких важных комплектующих изделиях, как буксовые подшипниковые узлы, применяется поддерживающий стандарт ГОСТ 32769–2014 (или ГОСТ 18572–2014). В стандарте для определения сертификационного показателя при проведении натурных стендовых испытаний подшипниковых узлов изменяется длительность единичных пробегов. Авторы на примере экспериментальных поездок высокоскоростного поезда показывают: за время, отведенное на единичный пробег (по стандарту), подшипниковые узлы не выходят на максимальные значения сертификационных показателей, что может привести к недостоверной оценке соответствия подшипниковых узлов требованиям безопасности. Для более достоверной оценки максимального превышения температуры подшипниковых узлов скоростного и высокоскоростного подвижного состава и приближения условий стендовых испытаний подшипниковых узлов к натурным условиям их эксплуатации предлагается рассмотреть возможность оставить в поддерживающем стандарте длительность единичных пробегов при проведении стендовых испытаний неизменной, т. е. не зависящей от конструкционной скорости подвижного состава.

Буксовый узел, железнодорожный подвижной состав, безопасность железнодорожного транспорта, конический подшипниковый узел, натурные стендовые испытания, суммарный условный пробег, критерий отказа, единичный пробег, сертификационный показатель, зона нагружения

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-202-215

Введение

Буксовые подшипниковые узлы — важнейшие элементы ходовых частей железнодорожного подвижного состава, от надежности которых во многом зависит безопасность железнодорожного транспорта.

Безопасность железнодорожного транспорта (в т. ч. и буксовых подшипниковых узлов железнодорожного подвижного состава) — это такое его состояние,

при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, а также окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений. Требования безопасности к скоростному подвижному железнодорожному составу определяются техническими регламентами Таможенного союза ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава» [1] и ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» [2].

Указанные регламенты могут быть распространены на скоростной и высокоскоростной железнодорожный подвижной состав и его составные части, выпускаемые в обращение для использования на железнодорожных путях шириной колеи 1520 мм на территории Таможенного союза со скоростями движения свыше 160 км/ч. Авторы статьи рассматривают подвижной состав с конструктивными скоростями свыше 160 км/ч, ведь именно эта скорость является граничной в стандартах ГОСТ 32769–2014 «Подшипники качения. Узлы подшипниковые конические букс железнодорожного подвижного состава. Технические условия» [3] и ГОСТ 18572–2014 «Подшипники качения. Подшипники буксовые роликовые цилиндрические железнодорожного подвижного состава. Технические условия» [4].

Подшипники качения для букс железнодорожного подвижного состава (согласно приложению № 8 «Перечень отдельных положений технического регламента ТС о безопасности железнодорожного подвижного состава, применяемых при обязательном подтверждении соответствия составных частей железнодорожного подвижного состава») должны соответствовать требованиям технических регламентов, определенных следующими пунктами статьи 4.

Пункт 4: железнодорожный подвижной состав и его составные части по техническому состоянию должны обеспечивать безопасное движение поездов с наибольшими скоростями в пределах допустимых значений.

Пункт 5 б: выполнение условий эксплуатации с учетом внешних климатических и механических воздействий.

Пункт 5 р: прочность при допустимых режимах нагружения и воздействиях.

Пункт 5 с: отсутствие пластических деформаций при приложении продольных и вертикальных расчетных динамических нагрузок.

Пункт 5 т: сопротивление усталости при малоцикловых и многоцикловых режимах нагружения.

Для подтверждения соответствия требованиям пунктов 4, 5 б, 5 р, 5 с и 5 т технических регламентов к буксовым подшипниковым узлам скоростного (высокоскоростного) железнодорожного подвижного состава назначаются стендовые натурные испытания буксовых подшипниковых узлов по ГОСТ 32769–2014 «Подшипники качения. Узлы подшипниковые конические букс железнодорожного подвижного состава. Технические условия», пункты 8.2.8

«Требования к нагреву конических подшипниковых узлов в условиях стендовых натуральных испытаний — по таблице А.2 (приложение А)» и 8.2.9 «Отсутствие отказов в условиях стендовых натуральных испытаний». Либо по ГОСТ 18572—2014 «Подшипники качения. Подшипники буксовые роликовые цилиндрические железнодорожного подвижного состава. Технические условия», пункты 8.2.11 «Требования к нагреву подшипников в условиях стендовых натуральных испытаний» и 8.2.12 «Отсутствие отказов в условиях стендовых натуральных испытаний» (в зависимости от конструкции испытуемого подшипника).

В ходе натуральных стендовых испытаний определение сертификационных показателей проводится в условиях максимально приближенных к условиям эксплуатации подшипников. В работах [5–16] испытатели приводят примеры максимального приближения условий стендовых испытаний к натурным. В работе [17] дан пример эволюции технических требований к колесным парам подвижного железнодорожного состава (в которые и входят буксовые подшипниковые узлы) в нормативных документах в зависимости от этапов развития подвижного состава и учета его эксплуатации на федеральном железнодорожном транспорте.

Авторы данной статьи для повышения достоверности оценок сертификационных показателей подшипниковых узлов при проведении стендовых испытаний по методам вышеприведенных стандартов предлагают рассмотреть их изменение в зависимости от длительности задаваемых единичных пробегов подшипниковых узлов. По результатам анализа экспериментальных поездок высокоскоростного электропоезда «Сапсан» можно проследить, как сертификационные показатели выходят на критические значения за пределами временных интервалов, определенных методами проведения испытаний по указанным стандартам. Для более достоверной оценки максимального превышения температуры подшипниковых узлов скоростного и высокоскоростного подвижного состава и приближения условий стендовых испытаний подшипниковых узлов к натурным условиям их эксплуатации предлагается оценить такую возможность: оставить в поддерживающих стандартах длительность единичных пробегов при проведении стендовых испытаний неизменной, т. е. не зависящей от конструкционной скорости подвижного состава.

1. Подтверждение соответствия буксовых подшипниковых узлов

Требования пунктов 8.2.8 и 8.2.9 ГОСТ 32769—2014 можно считать выполненными, если в ходе натуральных стендовых испытаний буксовых подшипниковых узлов подтверждено (в соответствии с пунктом А.13 указанного стандарта) соответствие сертификационных показателей (табл. А.2 приложения А ГОСТ 32769—2014) требуемым значениям. В статье предлагается остановиться на методе испытаний, изложенном в ГОСТ 32769—2014, т. к. опыт применения буксовых роликовых цилиндрических подшипников для скоростного и высокоскорост-

ного железнодорожного подвижного состава авторам неизвестен. За время, когда узлы прошли назначенный суммарный условный пробег, сертификационные показатели не должны превысить следующие значения.

1. Максимальное превышение температуры в зоне нагружения относительно температуры окружающей среды в течение первых 20 единичных пробегов — не более 80 °С.

2. Максимальное превышение температуры в зоне нагружения относительно температуры окружающей среды в течение каждого единичного пробега, исключая первые 20 единичных пробегов, — не более 70 °С. Допускается свыше 70 °С и до 80 °С, но не более 1 % единичных пробегов.

3. Максимальная разность температур двух буксовых узлов, измеренная одновременно в зонах нагружения в течение каждого единичного пробега в момент достижения максимальной температуры наиболее нагретого узла, — не более 20 °С. Допускается свыше 20 °С и до 25 °С, но не более 2 % единичных пробегов.

4. Максимальная разность температур для каждого буксового узла, измеренная в зоне нагружения между двумя последовательными единичными пробегами, — не более 20 °С. Допускается свыше 20 °С и до 25 °С, но не более 2 % единичных пробегов.

Для двух последних сертификационных показателей замеры проводятся за исключением первых 20 единичных пробегов.

Рассмотрим расчет продолжительности единичного пробега и продолжительности проведения натурных испытаний конических подшипниковых узлов для высокоскоростного электропоезда «Сапсан».

Детальное описание одного единичного пробега испытаний приведено на рис. 1 (соответствует приложению А рис. А.2. ГОСТ 32769–2014). На графике время разгона соответствует t_3 , время вращения оси станда с постоянной скоростью t_4 , время замедления соответствует времени разгона t_3 , время останковки станда t_5 .

Проведем по данным таблицы А.1 приложения А ГОСТ 32769–2014 расчет продолжительности единичного пробега t_2 :

$$t_2 = 2t_3 + t_4 + t_5.$$

В этом случае расчет будем вести при $t_3 = 10$ мин, $t_4 = 90$ мин и $t_5 = 10$ мин. Продолжительность единичного пробега будет равна 120 мин. При этом значения t_3 и t_4 должны быть в допуске ± 1 мин.

Проведем расчет эквивалентного расстояния, проходимого высокоскоростным электропоездом с испытуемым подшипниковым узлом за один единичный пробег при конструкционной скорости 250 км/ч:

во время разгона будет пройдено 22,9 км;

при номинальной скорости вращения оси станда будет пройдено 412,5 км;

при замедлении — 22,9 км;

итого за один единичный пробег будет пройдено 458,3 км.

Рис. 1. Временная диаграмма цикла испытаний

(Примечание: скорость вращения вала принимает отрицательные значения во время реверсного движения. Вал станда вращается вначале в одном направлении, затем в обратном. Этого требует стандарт к испытательному станду.)

Суммарный условный пробег назначается в зависимости от конструкционной скорости подвижного состава. Если скорость подвижного состава выше 160 км/ч и до 250 км/ч, то суммарный условный пробег в соответствии с пунктом А.11 приложения А ГОСТ 32769–2014 назначается 600 000 км.

Итак, ГОСТ 32769–2014 на натурных стандовых испытаниях подшипниковых узлов при конструкционных скоростях подвижного состава выше 160 км/ч увеличивает условный пробег подшипниковых узлов с 400 000 км до 600 000 км и одновременно снижает продолжительность единичного пробега с 4 до 2 ч. Увеличение условного пробега логично, но относительно снижения продолжительности единичного пробега у авторов этой статьи возникает вопрос: зачем оно нужно? Почему в таблице А.1 приложения А ГОСТ 32769–2014 значение t_4 уменьшается с 220 до 90 мин? Видимо, разработчики стандартов преследовали цель гармонизации требований и методов проведения испытаний с европейским стандартом EN 12082:2017 (Railway applications — Axleboxes — Performance testing) [18].

2. Результаты экспериментальных поездок высокоскоростных электропоездов

Посмотрим, какова длительность таких условно единичных пробегов высокоскоростных (или скоростных) поездов или локомотивов при их движении по инфраструктуре железных дорог.

1. Высокоскоростной электропоезд «Сапсан» (рис. 2) на маршруте Санкт-Петербург — Москва: от 3 ч 35 мин до 4 ч.

2. Высокоскоростной электропоезд «Сапсан» на маршруте Москва — Нижний Новгород: 3 ч 51 мин.

3. Скоростной поезд «Стриж» (рис. 3) на маршруте Москва — Нижний Новгород: 3 ч 35 мин.

4. Скоростной электропоезд «Аллегро» (рис. 4) на маршруте Санкт-Петербург — Хельсинки: от 3 ч 35 мин до 4 ч.

Рис. 2. Высокоскоростной электропоезд «Сапсан»

Рис. 3. Скоростной поезд «Стриж»

5. Электровоз ЭП-20 «Олимп» (рис. 5) на маршруте Санкт-Петербург — Москва: от 3 ч 45 мин до 4 ч.

Проследим, как изменяется температура подшипниковых узлов двух вагонов высокоскоростного электропоезда «Сапсан» в ходе 4-часовой испытательной поездки на участке Октябрьской железной дороги от Санкт-Петербурга до Москвы.

На рис. 6 и 7 показаны диаграммы изменения температуры подшипниковых узлов под вагонами высокоскоростного электропоезда «Сапсан» и скорости электропоезда в зависимости от времени поездки.

Рис. 4. Скоростной электропоезд «Аллегро»

Рис. 5. Электровоз ЭП-20 «Олимп»

Рис. 6. Диаграмма изменения температуры подшипниковых узлов под вагоном высокоскоростного электропоезда «Сапсан» при первой экспериментальной поездке

Рис. 7. Диаграмма изменения температуры подшипниковых узлов под вторым вагоном высокоскоростного электропоезда «Сапсан»

Начало поездки — 7:04 (Санкт-Петербург). Остановки в 7:46 (Чудово) и в 9:56 (Тверь) на 1 или 2 мин. Прибытие в Москву в 11:04. Длительность поездки 4 ч. Максимальная скорость при движении поезда была на участке в районе Мстинского моста — 230 км/ч.

На рисунках показан график изменения температуры окружающей среды, то есть температуры охлаждающего воздуха. Температура охлаждающего воздуха плавно изменяется в ходе поездки от 20 до 28 °С.

Сравним эти условия поездки с рекомендуемыми значениями при проведении стендовых натурных испытаний. Температура охлаждающего воздуха меняется от 20 до 28 °С, ГОСТ 32769–2014 рекомендует поддерживать температуру в диапазоне от 15 до 25 °С.

Максимальная температура подшипниковых узлов достигла 70 °С под первым вагоном через 3 ч после начала поездки и далее начала снижаться. Максимальное превышение температуры в зоне нагружения подшипниковых узлов под другим вагоном относительно температуры окружающей среды составило 47 °С. Под вторым вагоном превышение температуры составило 51 °С тоже примерно через 3 ч после начала пробега.

Таким образом, за время единичного пробега (2 ч) подшипниковые узлы на стенде не успевают разогреться до максимальных значений. При этом и оценка возможного превышения температуры не является достоверной.

Рассмотрим сравнительную диаграмму (прогноз) изменения температуры подшипниковых узлов при испытаниях по циклу для скоростного подвижного состава и по циклу испытаний для скоростей до 160 км/ч (рис. 8).

Рис. 8. Сравнительная диаграмма изменения температуры подшипниковых узлов при испытаниях по циклу для скоростного подвижного состава и по циклу испытаний для скоростей до 160 км/ч

После разгона подшипников до расчетных скоростей их температура имеет тенденцию расти до максимального значения (точка 2 на диаграмме), а затем, снижаясь, выходит на некоторое установившееся значение. Время единичного пробега, рассчитанного по методу стандартов [3, 4], обрывает процесс разогрева подшипников. Таким образом, критическая точка 2 остается за пределами оценки значений сертификационных показателей.

Заключение

Комплекс сертификационных испытаний должен обеспечить выполнение требований безопасности при допуске на инфраструктуру российских железных дорог железнодорожного транспорта, в т. ч. букс железнодорожного подвижного состава. При реализации комплекса испытаний должен отсутствовать недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни и здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, а также окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений.

С целью снижения таких рисков авторы статьи обращают внимание на необходимость эволюции требований и методов проведения испытаний применительно к отечественным условиям эксплуатации скоростного и высокоскоростного подвижного состава. Следует максимально приблизить условия сертификационных стендовых испытаний буксовых подшипниковых узлов к условиям эксплуатации — без увеличения стоимости проведения испытаний. В нормативных документах возможно предусмотреть использование иных испытательных стендов (к примеру, каткового стенда [5, 6]). Интересен и вопрос использования трассировочной нагрузки на подшипниковые узлы, возникающей на участках применения железнодорожного подвижного состава.

В связи с этим авторы предлагают пересмотреть необходимость уменьшения в таблице А.1 приложения А ГОСТ 32769–2014 значения t_4 с 220 до 90 мин. и оставить его равным 220 мин. Это сделает более достоверной оценку максимального превышения температуры подшипниковых узлов и приблизит условия стендовых испытаний к натурным условиям эксплуатации. Если для оценки сертификационных показателей необходимо сохранить число разгонов и торможений за время испытаний, то существует возможность частичного применения уменьшенного значения единичного пробега.

Библиографический список

1. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава»: утв. решением Комиссии Таможенного союза 15.07.2011 № 710) // Официальный сайт Евразийской экономической комиссии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eec.eaeunion.org>.

2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 002/2011 «О безопасности высоко-скоростного железнодорожного транспорта»: утв. решением Комиссии Таможенного союза 15.07.2011 № 710) // Официальный сайт Евразийской экономической комиссии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eec.eaeunion.org>.
3. ГОСТ 32769–2014 «Подшипники качения. Узлы подшипниковые конические букс железнодорожного подвижного состава. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2015.
4. ГОСТ 18572–2014 «Подшипники качения. Подшипники буксовые роликовые цилиндрические железнодорожного подвижного состава. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2015.
5. Liu D. Fatigue life prediction of the axle box bearings for high-speed trains / Liu D., Li Q., Hu W., Pan W. // DYNA. – 2017. – № 92. – P. 5.
6. Sen Cai. Fatigue life prediction of high-speed railway bearing based on contact stress / Sen Cai, Gang Zhang // 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). – 2017. – Pp. 650–653.
7. Li Y. Train axle bearing fault detection using a feature selection scheme based multi-scale morphological filter / Li, Y., Liang, X., Lin, J., Chen, Y., Liu, J. // Mech. Syst. Signal. Process. – 2018. – Pp. 101, 435–448.
8. Haidong, S., Hongkai, J., Xingqiu, L., Shuaipeng, W. Intelligent fault diagnosis of rolling bearing using deep wavelet auto-encoder with extreme learning machine. Knowl.-Based Syst. – 2018. – Pp. 140, 1–14.
9. Марков Д. С. Терминологические особенности этапов разработки и доказательства безопасности железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. С. Марков, О. А. Наседкин, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. – 2017. – № 3. – С. 368–379.
10. Batista L., Badri B., Sabourin R., Thomas M. A classifier fusion system for bearing fault diagnosis // Expert Syst. Appl. – 2013. – Pp. 40, 6788–6797.
11. Белишкина Т. А. Особенности подтверждения соответствия требованиям безопасности железнодорожной автоматики в переходный период после принятия технических регламентов таможенного союза / Т. А. Белишкина // Автоматика на транспорте. – 2016. – № 2. – С. 208–227.
12. Машошин О. Ф. Механизм формирования отказов и причины выхода из строя подшипниковых узлов элементов механизации летательных аппаратов / О. Ф. Машошин, В. К. Харина // Научный вестник МГТУ ГА. – 2007. – № 123. – С. 33–40.
13. Харина В. К. Методика проведения испытаний сферических шарикоподшипников 981000 серии / В. К. Харина // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – № 173. – С. 141–145.
14. Харина В. К. Методика проведения испытаний подшипников 83700 серии / В. К. Харина // Научный вестник МГТУ ГА. – 2013. – № 197. – С. 130–135.
15. Марков Д. С. Понятийный аппарат экспертизы и испытаний железнодорожной автоматики на безопасность / Д. С. Марков, О. А. Наседкин, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 1. – С. 30–45.
16. Пивоваров А. О. Стендовое испытание конических подшипников для планетарных передач / А. О. Пивоваров, Вл. П. Шевчук // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 6. – С. 34.
17. Грек В. И. Эволюция технических требований на колесные пары для скоростного подвижного состава / В. И. Грек, Г. И. Михайлов, В. И. Драгун // Вестник ВНИИЖТ. – 2017. – Т. 76. – № 1. – С. 51–56.
18. EN 12082:2017. Railway applications – Axleboxes – Performance testing.

Grekh Viktor I., PhD in Engineering
Safonov Vladimir I., Dr. Sci. in Engineering

Federal Budgetary Organization "Register of Certification on the Federal Railway Transport"
(FBO "RC FRT")

ONE ISSUE IN REFERENCE TO THE TESTS OF AXLE-BOX BEARINGS FOR HIGH-SPEED ROLLING STOCK

The release of rolling stock and its components for free circulation on the territory of the Customs Union shall be allowed only upon conformity confirmation with the requirements of Technical Regulations TP TC 001/2011 and TP TC 002/2011. For conformity assessment of such critical safety related rolling stock component as axle-box bearings the supporting standard GOST 32769–2014 (or GOST 18572–2014) is used. For traditional and high-speed rolling stock the standard foresees changing of the single run duration in the course of full-scale bench tests of axle-box bearings for determination of certification parameter. The example of the test runs of a high-speed train showed that during the time of such single run (in accordance with the standard) the axle-box bearings fail to reach the maximum values of the certification parameters, which can result in unreliable conformity assessment of the axle-box bearings with the safety requirements.

With the purpose to increase the reliability of the assessment of the maximum temperature of the axle-box bearings for traditional and high-speed rolling stock and also to bring the conditions of the bench tests of axle-box bearings to the full-scale operating conditions as possible, we propose to consider in the supporting standard the possibility of upholding the duration of single runs while conducting bench tests unchanged, independent of the design speed of the rolling stock.

Axle-box unit; rolling stock; safety of the railway rolling stock; taper bearing unit; rig performance test; rated cumulative distance; failure criterion; elementary trip; certification indicator; load zone.

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-202-215

References

1. Tekhnicheskiy reglament TR TS 001/2011 «O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava»: utv. resheniem Comissii Tamozhennogo sojusa 15.07.2011 № 710) // Oficialny sait Evrazijskoji Comissii Electronny resurs – Rezhim dostupa: <http://www.eec.eaeunion.org>. [Technical regulation of CU «On safety of the railway rolling stock»].
2. Tekhnicheskiy reglament TR TS 002/2011 «O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta» utv. resheniem Comissii Tamozhennogo sojusa 15.07.2011 № 710) // Oficialny sait Evrazijskoji Comissii Electronny resurs – Rezhim dostupa: <http://www.eec.eaeunion.org>. [Technical regulation of CU «On safety of the railway rolling stock»].
3. GOST 32769–2014. Podshipniki kachenija. Uzly podshipnikovyi konicheskikh buks zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tehnicheskie uslovija [Rolling bearings. The nodes of the conical bearing axle boxes of railway rolling stock. Technical specifications]. – M.: Standartinform, 2015.
4. GOST 18572–2014. Podshipniki kachenija. Podshipniki bucksovyi rolikovyi cilindricheskie zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tehnicheskie uslovija. [Rolling bearings. Cylindrical roller box bearings of railway rolling stock. Technical specifications]. – M.: Standartinform, 2015.
5. Liu D., Li Q., Hu W., Pan W. Fatigue life prediction of the axle box bearings for high-speed trains // DYNA. – 2017. – № 92 – P. 5.

6. *Sen Cai, Gang Zhang* Fatigue life prediction of high-speed railway bearing based on contact stress // 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). – 2017. – Pp. 650–653.
7. *Li Y., Liang, X., Lin J., Chen Y., Liu J.* Train axle bearing fault detection using a feature selection scheme based multi-scale morphological filter // Mech. Syst. Signal. Process. – 2018, 101. – Pp. 435–448.
8. *Haidong S., Hongkai J., Xingqiu, L., Shuaipeng, W.* Intelligent fault diagnosis of rolling bearing using deep wavelet auto-encoder with extreme learning machine. Knowl.-Based Syst. – 2018, pp. 140, 1–14.
9. *Markov D. S., Nasedkin O. F., Vasiliev D. A., Butusov M. A.* Terminologicheskie osobenosti etapov rasrabotki i dokasatelstva besopasnosti zhelesnodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki [Terminological features of development stages and proof of safety of railway automation and telemechanics] // Avtomatika na transporte. – 2017. – № 3. – Pp. 368–379.
10. *Batista L., Badri B., Sabourin R., Thomas M.* A classifier fusion system for bearing fault diagnosis. Expert Syst. Appl. 2013, pp. 40, 6788–6797.
11. *Belishkina T. A.* Osobenosti podtverzhdeniya sootvetstvia trebovanijam besopasnosti zheleznodorozhnoy avtomatiki v perekhodnyi period posle prinjatia tehniceskikh reglamentov tamozhennogo sojusa [Features of confirming compliance with security requirements railway automation in the transition period after the adoption of technical regulations of the customs union] // Avtomatika na transporte. – 2016. – № 2. – Pp. 208–227.
12. *Mashoshin O. F., Kharina V. K.* Mekhanizm formirovanija otkasov i prichiny vyhoda iz stroja podshipnikov uslov elementov mekhanisacii letatelnyh apparatov [The mechanism of formation of cracks and the reasons for the failure of the bearing units of the elements of the mechanization of aircraft] // Nauchny vestnik MGTU GA. – 2007. – № 123. – Pp. 33–40.
13. *Kharina V. K.* Metodika provedenija ispytanij sfericheskikh sharikopodshipnikov 981000 serii [Test procedure for spherical ball bearings 981000 series] // Nauchny vestnik MGTU GA. – 2011. – № 173. – Pp. 141–145.
14. *Kharina V. K.* Metodika provedenija ispytanij sfericheskikh sharikopodshipnikov 83700 serii [Test procedure for spherical ball bearings 83700 series] // Nauchny vestnik MGTU GA. – 2013. – № 197. – Pp. 130–135.
15. *Markov D. S., Nasedkin O. F., Vasiliev D. A., Butusov M. A.* Ponjatijnyj apparat ekspertisy i ispytanij zhelesnodorozhnoi avtomatiki na besopasnost [Conceptual framework for the expertise and testing of railway automation for safety] // Avtomatika na transporte. – 2018. – № 1. – Pp. 30–45.
16. *Pivovarov A. O., Shevchuk V. P.* Stendovoe ispytanie konicheskikh podshipnikov dlja planetarnykh peredach [Bench testing of tapered bearings for planetary gears] // Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik. – 2015. – № 6. – P. 34.
17. *Grech V. I.* Evolucija tehniceskikh trebovanij na kolesnye pary dlja skorostnogo podvizhnogo sostava [Evolution of technical requirements for wheelsets for high-speed rolling stock] // Vestnik VNIIZHT. – 2017. – V. 76. – № 1 – Pp. 51–56.
18. EN 12082:2017. Railway applications – Axleboxes – Performance testing.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
доцентом О. А. Наседкиным
Поступила в редакцию 27.11.2020, принята к публикации 25.12.2020*

ГРЕК Виктор Иванович — кандидат технических наук, инженер-испытатель испытательного центра федерального бюджетного учреждения «Регистр сертификации на федеральном железнодорожном транспорте»
vgrek@yandex.ru

САФОНОВ Владимир Иванович — доктор технических наук, инженер-испытатель испытательного центра федерального бюджетного учреждения «Регистр сертификации на федеральном железнодорожном транспорте»
safonov1953@yandex.ru

© Грек В. И., Сафонов В. И., 2021