
ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.4.027

Анализ современных подшипниковых узлов, применяемых для высокоскоростного состава, и перспективы их развития

А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, Н. А. Битюцкий, Н. К. Мигулин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Воробьев А. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г., Битюцкий Н. А., Мигулин Н. К. Анализ современных подшипниковых узлов, применяемых для высокоскоростного состава, и перспективы их развития // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 7–17. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-7-17

Аннотация

Цель: Установить основные направления увеличения срока службы и надежности подшипниковых узлов для высокоскоростного подвижного состава. **Методы:** Проведен анализ современных конструкций подшипников и новых материалов, применяемых при их изготовлении. **Результаты:** Анализ выполненных исследований показал, что все рассмотренные конструкции подшипниковых узлов фирмы NSK в основном соответствуют сегодняшним запросам железных дорог, работающих со скоростями до 320 км/ч, и способны обеспечивать безопасность движения поездов при всех существующих условиях эксплуатации. Разработаны рекомендации по комплектации подшипниками буксовых узлов подвижного состава, работающих наиболее успешно при особых условиях эксплуатации. Рассмотрены вопросы контроля неисправности буксовых узлов, работающих на высокоскоростных поездах: TGV, ICE и Talgo, и систем их бортового диагностирования. Дана оценка отечественной системы такого контроля и показаны преимущества отечественной системы перед зарубежными аналогами. Предложено решение диагностики поездов в условиях режима «черного ящика». **Практическая значимость:** Применение современных конструкций подшипников, новых материалов и системы диагностики позволяет повысить надежность и работоспособность рельсового подвижного состава.

Ключевые слова: высокоскоростной подвижной состав, подшипниковый узел, новые материалы, уменьшение коэффициента трения, повышение работоспособности, бортовая система диагностики буксовых узлов.

Подшипники являются важнейшей частью буксового узла. Буксовые узлы располагаются на шейках оси и преобразуют вращательное движение колесной пары в поступательное движение вагона. Они воспринимают и передают колесным парам силы тяжести вагона, а также динамические нагрузки, возникающие при движении

вагона по кривым участкам пути, стрелочным переводам, неровностям пути и стыкам рельсов, при торможении, при наличии дефектов на поверхности катания [1–5].

Основными параметрами подшипников, характеризующими их назначение и качество, являются:

- характеристики радиальных и осевых нагрузок;
- максимальная скорость вращения;
- размеры под посадки в буксовом узле;
- точность подшипников;
- характеристики смазывающих материалов;
- ресурс подшипников до появления признаков усталости, в оборотах;
- наличие шумов и вибрации при работе подшипников.

Буксовый подшипник — это сборочный узел, который является частью опоры или упора и поддерживающий вал, ось или иную подвижную конструкцию с заданной жесткостью. Он также фиксирует положение в пространстве, обеспечивает вращение, качение или линейное перемещение (для линейных подшипников) с наименьшим сопротивлением, воспринимает и передает нагрузку от подвижного узла на другие части конструкции, как в радиальном направлении (перпендикулярно оси вращения подшипника), так и в осевом направлении (параллельно оси вращения подшипника).

Значительный вклад в создание высокоскоростного подвижного состава (ПС) внесли технологии, предложенные японскими компаниями, такими как NSK. Ее продукция — это высококачественные подшипники букс, тяговых двигателей и редукторов. В прошлом они использовались в качестве оборудования для поездов Синкансэн серии Н5 сети поездов, курсирующих между городами Аомори и Саппоро. В значительной степени в этом проекте уделялось внимание безопасности и надежности ПС, так как средняя скорость составов составляла 320 км/ч. Поэтому понятно, почему были предложены самые качественные буксовые подшипники (на тот период), характеризующиеся высокими показателями. Железнодорожный оператор Hokkaido Railway подобрал комплект подшипников NSK, разработанных специально для жестких требований высокоскоростного движения. Для буксовых подшипниковых узлов были выбраны двухрядные цилиндрические роликовые подшипники в масляной ванне, отличающиеся малым нагревом даже на высоких оборотах и увеличенным эксплуатационным ресурсом.

Для защиты от повреждений, вызванных сильными токами тяговых электродвигателей, носящих импульсный характер, выбраны изолированные подшипники с диэлектрическим керамическим покрытием, что отличает новое поколение тяговых двигателей от предыдущих. Такое конструктивное решение, хорошо зарекомендовавшее себя в эксплуатации, существенно повышает работоспособность как подшипников, так и двигателей.

В редукторах и приводах колесных пар, подверженных вибрациям, с целью повышения ударопрочности стали использовать подшипники с усиленным сепаратором и с дорожками качения, упрочненными азотированием.

Начиная с начала 60-х годов прошлого века все поезда Синкансэн, предназначенные для высокоскоростного движения, стали комплектовать только подшипниками NSK. В настоящее время железнодорожные подшипники NSK также доминируют на рынках Японии в области своего применения.

В связи с развитием разработок более эффективных электромоторов, соответствующих современным стандартам, важно, чтобы все компоненты, в том числе и подшипники, также соответствовали новейшим спецификациям. Поэтому в конструкцию были внесены существенные инновационные изменения, затрагивающие технологии изготовления материала, точность изделий и производственные процессы. За счет улучшения обработки поверхностей элементов подшипников удалось уменьшить уровень трения, что, в свою очередь, сокращает расход энергии и уровень шума. Эта компания успешно работает и в направлении улучшения смазки, что позволяет ожидать еще большее увеличение срока службы изделия.

Для увеличения срока службы подшипников NSK использует специальные материалы, такие как сталь Z, EP и SHX. Сталь SHX обладает превосходной стойкостью к заеданию при очень высоких скоростях. Подшипники NSK хорошо работают на высоких скоростях благодаря использованию шариков из сверхвысокопрочной стали и высокоэффективных легких керамических элементов подшипника. Для изготовления сепараторов подшипников NSK используют как широко распространенные материалы, например различные полимеры (альдегидно-фенольные), полиамиды, так и новые специальные полимеры, которым свойственны такие преимущества, как высокая жесткость и термостойкость, а также малый удельный вес. Вследствие этого они надежно работают при различных условиях эксплуатации, а сталь SHX, как более жаропрочная, позволяет увеличить долговечность подшипников при установке их на высокоскоростной ПС. Эта сталь по своим показателям близка к стали M50, которую применяют в узлах реактивных двигателей. Рабочая температура в этих узлах достигает 300 °С. Помимо высокой жаропрочности, сталь SHX характеризуется и небольшим коэффициентом трения, хорошей устойчивостью к вмятинам и всеми другими характеристиками, необходимыми для подшипников, работающих в условиях сверхвысокоскоростных режимов.

В апреле 2007 года мировой рекорд скорости для подвижного состава был установлен высокоскоростным поездом V150, который составил 574,8 км/ч. На локомотиве данного поезда мощностью 18 400 кВт были установлены буксовые подшипники SNR. Процесс конструирования и строительства локомотива занял 14 месяцев. Поставки на линии TGV этих подшипников начались в 1981 году. Знаменательно и то, что мировые рекорды скорости для вертолетов, поездов,

самолетов и мотоциклов (общим количеством 6) были установлены на указанных видах транспорта, оборудованных подшипниками SNR.

Одним из самых перспективных потребителей локомотивов V150 считается Китай. Правительством Китая запланировано на ближайшие годы строительство 12 000 км высокоскоростных железнодорожных линий.

Также для ПС, работающего с высокими скоростями, были разработаны и подшипники EG15, в конструкции которых были предусмотрены сепараторы со стеклонаполненным полиамидом. Они успешно работают в условиях длительной эксплуатации с высокими скоростями в зонах с небольшими температурами и вибрациями (рис. 1). Особенности этих подшипников заключаются в том, что их конструкция обеспечивает:

- значительную прочность сепаратора за счет высокой гибкости используемых эластичных материалов в конструкции подшипника. Эти подшипники являются двухрядными с независимыми сепараторами;
- качество движения роликов обеспечивается специальным, охватывающей формой, сепаратором, изготовленным высокоточным методом литья;
- бесперебойную качественную подачу в зону трения смазки. В конструкции сепараторов для этого предусмотрены соответствующие отверстия. Существенную роль играет и невысокий коэффициент трения благодаря применению пары материалов — сталь и полиамид, что также положительно сказывается и на существенном снижении уровня шума;
- хорошую устойчивость к коррозионным процессам, так как сепаратор устойчив к повреждениям вследствие попадания в подшипник воды и к возникающим электрохимическим процессам;
- длительную работу подшипника при воздействии температуры до 120 °С и кратковременную — 150 °С;
- возможное изменение внутреннего диаметра отверстий в диапазоне 25–400 мм.

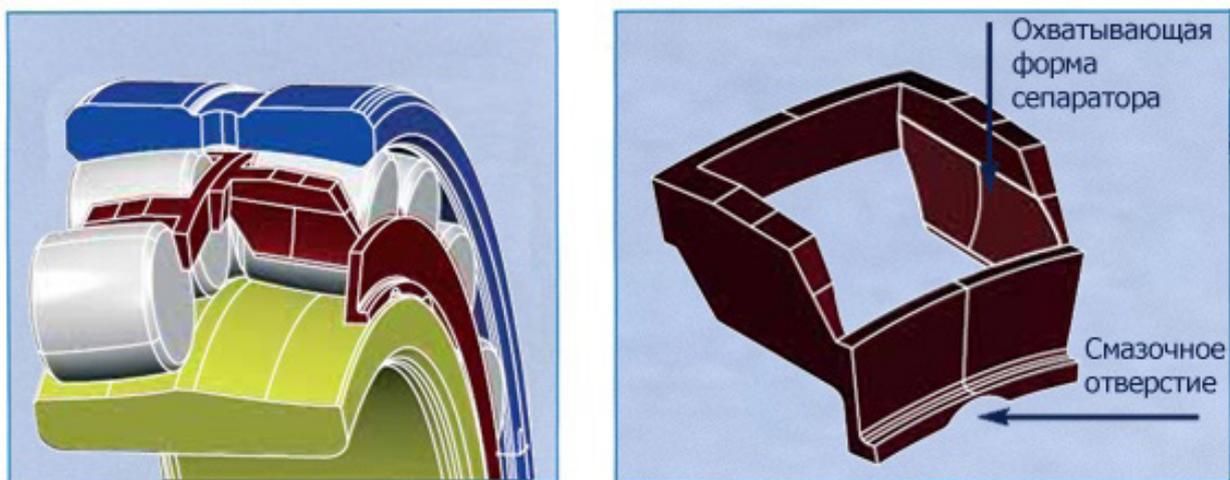


Рис. 1. Подшипники с сепаратором типа EG15

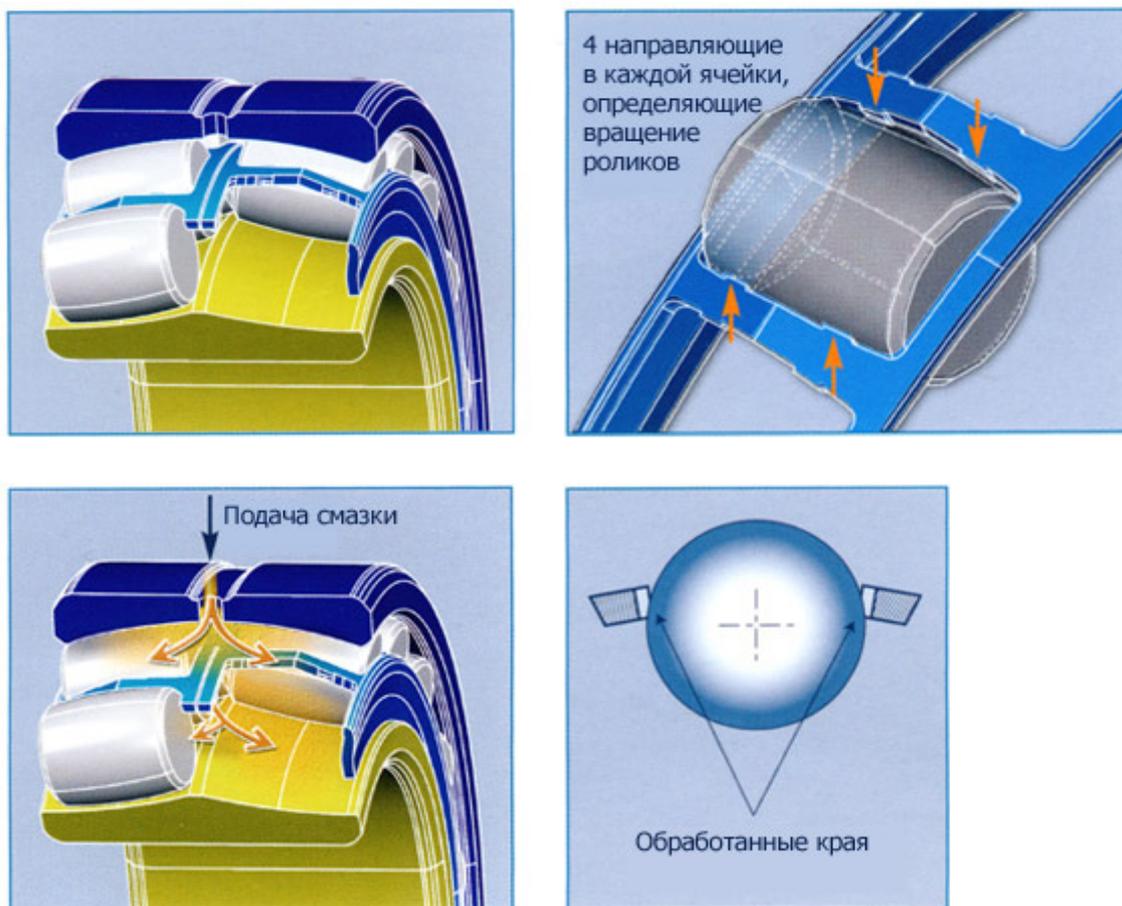


Рис. 2. Подшипники с сепаратором типа EA

Кроме того, широко применяются и подшипники типа EA, имеющие стальной сепаратор и предназначенные для «общего применения», но они также могут использоваться и в узлах, работающих на режимах с температурами более 150 °С и с малыми вибрациями (рис. 2).

Конструктивные особенности подшипника с сепаратором типа EA обеспечивают:

- широкий температурный диапазон от минус 60 до 200 °С;
- точное позиционирование сепаратора относительно дорожки качения внутреннего кольца и плоскости вращающегося подшипника с помощью прецизионных направляющих роликов;
- точная центровка роликов подшипника осуществляется в сепараторе с четырьмя направляющими, что гарантирует идеальную центровку вращающихся элементов без дополнительных компонентов;
- уменьшение коэффициента трения и износа подшипника при работе его на высоких скоростях за счет обработки поверхности подшипникового сепаратора (фосфатизация — масляная закалка);

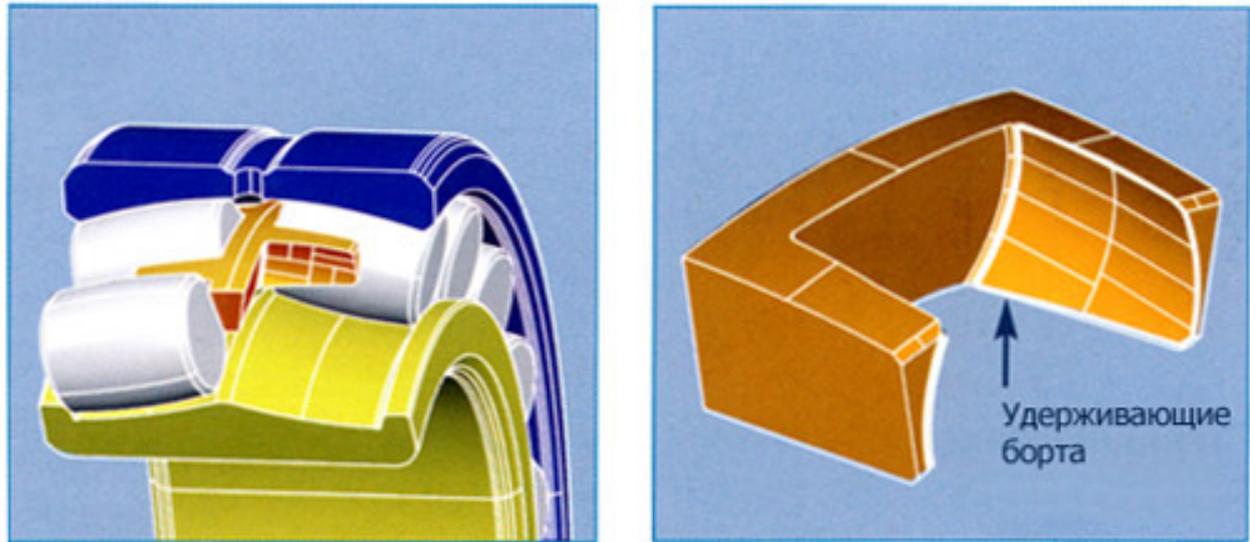


Рис. 3. Подшипники с латунным сепаратором типа EM

– превосходное смазывание всех элементов конструкции, сохраняющее вследствие особой формы сепаратора, сохраняющее запас смазки в подшипнике и облегчающее растекание. Подшипники с сепараторами типа EM стандартно производятся с диаметрами внутреннего отверстия от 25 до 400 мм.

Подшипники с латунным сепаратором типа EM (рис. 3) специально разработаны для работы в условиях высоких температур (до 200 °С) и тяжелых эксплуатационных режимах (высокие скорости вращения, ударные нагрузки, загрязнение и т. д.).

Особенности подшипников с сепаратором EM:

- прочная латунная обойма минимизирует влияние резонанса;
- пластическая деформация латуни повышает прочность и устойчивость к ударным нагрузкам;
- самосмазывающиеся свойства материала сепаратора снижают трение при высоких скоростях вращения;
- боковые рычаги расположены на внутреннем кольце подшипника, поэтому сепаратор находится в центре вращающегося тела;
- контакт с кольцом сепаратора отсутствует, что предотвращает связывание подшипника из-за теплового расширения;
- срок службы при вибрации в семь раз больше, чем у подшипников со стальным сепаратором;
- постоянная температура для работы при высоких температурах (до 200 °С);
- поставляются в стандартном исполнении с диаметром отверстия от 25 мм до 400 мм.

Двухрядные конические роликоподшипники с сепаратором используются в высокоскоростных поездах TGV (Франция), ICE (Германия) и Talgo (Испания), которые движутся со скоростью от 200 до 350 км/ч. (рис. 4).



Рис. 4. Общий вид кассетного подшипника

Двухрядные картриджные подшипники с коническим роликовым сепаратором широко используются в системе привода высокоскоростных железнодорожных транспортных средств благодаря следующим преимуществам:

1. Приспособленность к высоким комбинированным нагрузкам, обеспечивающая высокую топливную экономичность и работу железнодорожного транспорта в пределах установленных интервалов технического обслуживания.

2. Геометрия подшипника подходит для работы на высоких скоростях.

3. Компактная конструкция.

4. Экономически эффективное централизованное техническое обслуживание благодаря принципу картриджной конструкции.

Все рассмотренные и проанализированные конструкции современных буксовых узлов имеют свои достоинства и успешно работают на высокоскоростном подвижном составе. Однако прогресс не стоит на месте, и уже сегодня в европейской железнодорожной системе проходят тесты локомотивы и вагоны, работающие на интеллектуальных подшипниках для колесных пар, со встроенными датчиками, которые измеряют температуру, скорость и ускорение.

На сегодняшний день тепловой метод контроля буксовых узлов является основным методом контроля состояния подшипниковых узлов на европейских и российских железных дорогах. Следует отметить, что с помощью теплового контроля невозможно на ранней стадии развития выявить такие дефекты буксового узла, как трещины в кольцах, роликах и сепараторах, которые представляют существенную угрозу для безопасности движения поездов.

На высокоскоростном транспорте проблема своевременного обнаружения неисправностей подшипниковых узлов является крайне актуальной, так как неисправный подшипниковый узел может привести к сбою графика движения поездов или к крушению поезда с тяжелыми последствиями, но и эта проблема не является уже нерешаемой.

В России ООО «Меткатом» разработана новая бортовая система диагностики буксовых подшипниковых узлов вагонов и локомотивов, которая позволяет не только контролировать температуру подшипниковых узлов, но и определять

остаточный ресурс подшипника (время или пробег до возникновения неисправности), что дает возможность заранее планировать ремонтные работы по подшипниковому узлу. Система разработана на основе уникальной разработки российских ученых — анализатора ресурса подшипников АРП-11. Следует отметить, что в области диагностики подшипниковых узлов последние российские разработки опережают мировые достижения. В ближайшее время следует ожидать, что за счет перехода подвижного состава на необслуживаемые кассетные подшипники на ремонтных предприятиях железных дорог России могут быть ликвидированы роликовые отделения. Но здесь возникает другая проблема — эксплуатация подшипникового узла в режиме «черного ящика», то есть при существующих методах контроля невозможно получить информацию о состоянии элементов подшипникового узла и своевременно принять меры к замене неисправного подшипника. Однако возможность использования бортовой системы диагностики на базе прибора АРП-11 позволит решить эту проблему [6, 7].

Не стоит забывать и о положительном влиянии на окружающую среду, поскольку до 50–60 % смазки остается в кюветах и рельсах локомотивов.

В прогнозах о путях развития и совершенствования конструкций буксовых узлов следует учитывать успешное развитие такой науки, как триботехника. В последнее время создан целый ряд уникальных антифрикционных материалов, обеспечивающих коэффициент трения не выше 0,002 (антифрикционные покрытия на основе дисульфида молибдена), что делает в перспективе возможным возврат на высокоскоростном транспорте к подшипникам скольжения, которые, естественно, существенно проще по конструкции и имеют более высокую допускаемую скорость вращения. Также последние исследования показали, что в ближайшей перспективе следует ожидать, что для высокоскоростного транспорта будут созданы магнитные подшипники, у которых соединение является механически бесконтактным. Связь в них осуществляется с помощью сил электромагнитного поля (вращающийся вал буквально парит в мощном магнитном поле).

Библиографический список

1. Киселев И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, Н. С. Бушуев и др. // Общий курс. Учебное пособие в 2-х томах. — М., 2014. — Т. 1.
2. Цуканов Н. В. Способы повышения работоспособности буксовых узлов на железнодорожном транспорте / Н. В. Цуканов, Т. С. Титова, А. А. Воробьев // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте рельсового подвижного состава: сборник трудов национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. — 2022. — С. 5–11.
3. Кононов Д. П. Железнодорожные подшипники кассетного типа / Д. П. Кононов, К. А. Румаков // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава

РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 20–21 ноября 2015 г. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. — С. 25–26.

4. Поляхов Н. Д. Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников. / Н. Д. Поляхов, А. Д. Стоцкая. — М.: Научное приборостроение, 2012. — Т. 22, № 4, 5. — 18 с.

5. Урушев С. В. Ресурс и технология изготовления металлических сепараторов кассетных подшипников / С. В. Урушев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2014. — № 1(10). — С. 143–158.

6. Трусов А. А. Оценка эксплуатационных свойств и ресурса буксовых подшипников, применяемых на подвижном составе РЖД / А. А. Трусов, А. М. Будюкин // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 17–21.

7. Васильев В. О. Оценка качества роликов подшипников качения буксовых узлов, упрочненных современными технологическими методами / В. О. Васильев, В. Г. Кондратенко // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 41–43.

Дата поступления: 05.05.2023

Решение о публикации: 18.06.2023

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, проф.; 79219751198@yandex.ru

БУДЮКИН Алексей Митрофанович — канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

КОНДРАТЕНКО Владимир Григорьевич — канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

БИТЮЦКИЙ Никита Александрович — канд. техн. наук, доц.; bna@engcenter.ru

МИГУЛИН Никита Константинович — аспирант; migulinnik@rambler.ru

Analysis of Modern Bearing Assemblies Used for High-Speed Rolling Stock and Prospects for their Development

A. A. Vorobyev, A. M. Budjugin, V. G. Kondratenko, N. A. Bityutskiy, N. K. Migulin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Vorobyev A. A., Budjugin A. M., Kondratenko V. G., Bityutskiy N. A., Migulin N. K. Analysis of Modern Bearing Assemblies Used for High-Speed Rolling Stock and Prospects for their Development. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 7–17. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-7-17

Summary

Purpose: To identify the main directions for increasing the service life and reliability of bearing assemblies for high-speed rolling stock. **Methods:** An analysis of modern bearing designs and new materials used in their manufacturing has been conducted. **Results:** The analysis of the conducted research has shown that all the examined designs of bearing assemblies produced by NSK company mainly meet the current demands of railways operating at speeds up to 320 km/h, and can ensure the safety of train movement under all existing operating conditions. Recommendations for equipping the axle box units of rolling stock with bearings that perform most successfully under special operating conditions have been developed. The issues of monitoring the faults of axle box units operating on high-speed trains, such as TGV, ICE, and Talgo, and the systems of their onboard diagnostics, have been addressed. An assessment of the domestic control system is provided, and its advantages over foreign counterparts are demonstrated. A solution for diagnosing trains under the 'black box' regime has been proposed. **Practical significance:** The application of modern bearing designs, new materials, and diagnostic systems allows for an increase in the reliability and performance of railway rolling stock.

Keywords: High-speed rolling stock, bearing unit, new materials, friction coefficient reduction, increased performance, onboard diagnostic system for axle box units.

References

1. Kiselev I. P., Blazhko L. S., Bushuev N. S. et al. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport [High-speed rail transport]. Obshchiy kurs. Uchebnoe posobie v 2-kh tomakh [General course. Textbook in 2 volumes]*. Moscow, 2014, vol. 1. (In Russian)
2. Tsukanov N. V., Titova T. S., Vorob'ev A. A. *Sposoby povysheniya rabotosposobnosti buksovykh uzlov na zheleznodorozhnom transporte. Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte rel'sovogo podvizhnogo sostava: sbornik trudov natsional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh [Ways to improve the performance of axle boxes in railway transport. Progressive technologies used in the repair of rail rolling stock: a collection of proceedings of the national scientific and technical conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists]*. 2022, pp. 5–11. (In Russian)
3. Kononov D. P., Rumakov K. A. *Zheleznodorozhnye podshipniki kassetnogo tipa. Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 20–21 noyabrya 2015 g. [Railway cassette-type bearings. Progressive technologies used in the repair of Russian Railways rolling stock: a collection of proceedings of the conference of students, graduate students and young scientists, St. Petersburg, November 20–21, 2015]*. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, pp. 25–26. (In Russian)
4. Polyakhov N. D., Stotskaya A. D. *Obzor sposobov prakticheskogo primeneniya aktivnykh magnitnykh podshipnikov [Review of methods for the practical application of active magnetic bearings]*. Moscow: Nauchnoe priborostroenie Publ., 2012, vol. 22, Iss. 4, 5, 18 p. (In Russian)
5. Urushev S. V., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. et al. *Resurs i tekhnologiya izgotovleniya metallicheskiy separatorov kassetnykh podshipnikov [Resource and manufacturing technology of*

metal cages for cassette bearings]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of results of scientific research]. 2014, Iss. 1(10), pp. 143–158. (In Russian)

6. Trusov A. A., Budyukin A. M. *Otsenka ekspluatatsionnykh svoystv i resursa buksovykh podshipnikov, primenyaemykh na podvizhnom sostave RZhD. Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Evaluation of the operational properties and resource of axle bearings used on the rolling stock of Russian Railways. Progressive technologies used in the repair of rolling stock of Russian Railways: a collection of proceedings of the conference of students, graduate students and young scientists]. 2017, pp. 17–21. (In Russian)

7. Vasil'ev V. O., Kondratenko V. G. *Otsenka kachestva rolikov podshipnikov kacheniya buksovykh uzlov, uprochnennykh sovremennymi tekhnologicheskimi metodami. Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Evaluation of the quality of rolling bearing rollers of axlebox units hardened by modern technological methods. Progressive technologies used in the repair of rolling stock of Russian Railways: a collection of proceedings of the conference of students, graduate students and young scientists]. 2017, pp. 41–43. (In Russian)

Received: May 05, 2023

Accepted: June 18, 2023

Author's information:

Alexandr A. VOROYEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; 79219751198@yandex.ru

Alexey M. BUDJUKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru

Vladimir G. KONDRATENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru

Nikita A. BITYUTSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor; bna@engcenter.ru

Nikita K. MIGULIN — Postgraduate Student, migulinnik@rambler.ru