

ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

БАРАНОВ Леонид Аврамович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой¹;
e-mail: baranov.miit@gmail.com

БУРЧЕНКОВ Валерий Васильевич — канд. техн. наук, доцент²; e-mail: lenadva@tut.by

¹ Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление и защита информации», Москва, Россия

² Белорусский государственный университет транспорта, кафедра «Вагоны», Гомель, Беларусь

Рассмотрены функциональные возможности информационно-измерительных систем для дистанционного выявления неисправных деталей ходовой части вагонов в движении. Оценены особенности использования волоконно-оптических кабелей, проложенных вдоль железнодорожных путей, в качестве датчиков для определения дефектов в подвижном составе и инфраструктуре железнодорожных линий. Исследовано влияние внешних физических воздействий от движущегося поезда на длину отраженной волны оптоволоконных брэгговских решеток. Показана возможность использования дистанционного акустического зондирования для определения дефектов деталей и узлов подвижного состава на ходу поезда, отмечен метод повышения точности локализации вагонных осей с дефектами в контролируемых поездах за счет использования отметчиков прохода колесных пар, счетчиков осей и вагонов. Предложена оценка условий обеспечения работоспособности и регулировки распределенной волоконно-оптической линии датчиков для участка железной дороги. Разработана схема размещения устройств дистанционного акустического зондирования на полигоне Белорусской железной дороги. Установлена возможность оперативного выявления дефектных колесных пар с предельно допустимой величиной ползунов, превышающих 1,0 мм, а также изломов боковой рамы вагонной тележки для предупреждения опасных аварийных ситуаций. Предложены способ размещения оптоволоконного кабеля на подошве рельсов и методика непрерывного мониторинга технического состояния подвижного состава в движении, обеспечивающая повышенный контроль исправности деталей и узлов подвижного состава.

Ключевые слова: подвижной состав; железнодорожные линии; диагностические системы; оптоволоконные кабели; дистанционное акустическое зондирование; распределенные оптоволоконные датчики; счетчики осей; волоконная брэгговская решетка.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-01-90-100

Введение

Для решения задач по повышению безопасности движения поездов, с одновременным сокращением эксплуатационных затрат, эффективно применение инновационных цифровых систем диагностирования и слежения за техническим состоянием ответственных деталей и узлов ходовой части вагонов в контролируемых поездах [1–6].

Автоматическое измерение параметров колесных пар подвижного состава на ходу поезда может выполняться с помощью системы автоматического обмера колесных пар Комплекс-2, системы оценки дефектов колес на поверхности катания LASCA, системы автоматического обмера колес АСОК, комплекса технических средств КТСМ-К [1–3]. Данные

о параметрах колесных пар каждого проконтролированного поезда концентрируются и регистрируются для последующего хранения в базах данных [7]. Эти системы измерения осуществляют однократное измерение температуры буксовых узлов вагонных колес или выявление заторможенных колес с интервалом 30–35 км в попутном направлении движения поезда и не обеспечивают непрерывный технический контроль подвижного состава в процессе движения, что является существенным недостатком указанных систем [4]. Для предупреждения аварийных ситуаций необходим непрерывный технический контроль исправности деталей и узлов вагонов, позволяющий немедленно или в короткие сроки выявлять опасные дефекты в ходовой части вагонов.

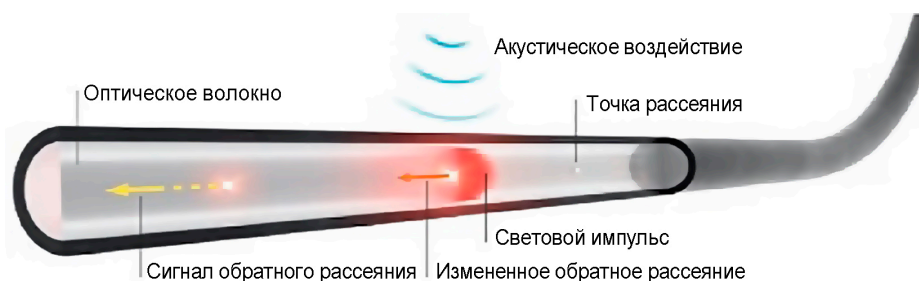


Рис. 1. Влияние внешнего акустического воздействия на изменение интенсивности сигнала обратного рассеяния в одномодовом волокне

К таким, внезапно возникающим дефектам, относится ползуны на поверхности катания колесных пар и изломы боковых рам вагонных тележек. Целью данной статьи является исследование вопросов внедрения технологий слежения за техническим состоянием подвижного состава, основанных на использовании распределенных виртуальных акустических датчиков в волоконно-оптическом кабеле, размещаемом вдоль железнодорожной линии [5].

1. Постановка задачи

Цифровизация систем диагностики и технического контроля подвижного состава находится в ряду актуальных задач, успешное решение которых обеспечит дальнейшее повышение безопасности перевозочного процесса. В настоящее время многие страны мира уделяют повышенное внимание разработке способов мониторинга технического состояния ходовой части вагонов, основанных на применении волоконно-оптических кабелей для дистанционного акустического зондирования проходящих поездов [1–6]. Для формирования виртуальных акустических датчиков в оптоволоконно передаются световые импульсы высокой частоты, формируемые лазерным источником, с последующей оценкой отраженного сигнала (рис. 1).

Принцип дистанционного акустического зондирования DAS (Distributed Acoustic Sensing) заключается в регистрации изменений в отражениях световых сигналов, посылаемых в волоконно-оптический кабель лазерным импульсным излучателем. Разделительный фильтр рефлектометра выделяет сигналы обратного рассеяния, модулируемые механическими или тепловыми воздействиями на оптоволоконно. Длина отраженной волны λ_B подвержена

влиянию любой вариации указанных воздействий при использовании волоконной брэгговской решетки (ВБР) [7–9].

Центральная длина волны сигнала отражения определяется условием Брэгга [10] и зависит от коэффициента модуляции показателя преломления (ПП):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \tag{1}$$

где λ_B — центральная длина волны брэгговского резонанса, нм;
 n_{eff} — эффективный ПП сердцевины волокна для центральной длины волны, пм/мкэ;
 Λ — период ВБР, пм.

Используя выражение (1), смещение центральной длины волны отражения под действием механической деформации и температуры можно записать в виде следующего уравнения:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{dn}{dl} + n \frac{d\Lambda}{dl}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{d\Lambda}{dT}\right)\Delta T, \tag{2}$$

где ΔT — изменение температуры, °С;
 Δl — изменение деформации растяжения/сжатия, нм.

Физический смысл первого слагаемого в выражении (2) заключается в изменении периода ВБР и ПП, вызванного упругооптическим эффектом, определяемым по следующему выражению:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_{B0}(1 - \rho_e)\epsilon(z), \tag{3}$$

где ρ_e — эффективная упругооптическая постоянная, пм, определяется как:

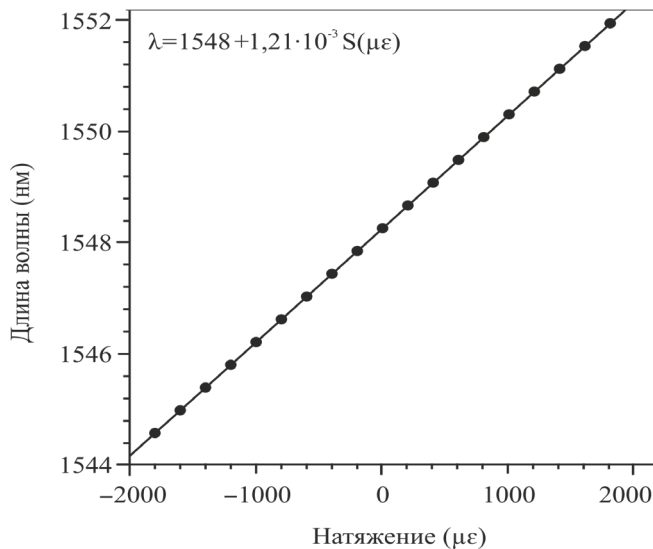


Рис. 2. Характеристика изменения брэгговской длины волны отражения сигнала в зависимости от деформации при физическом натяжении или сжатии оптоволокна

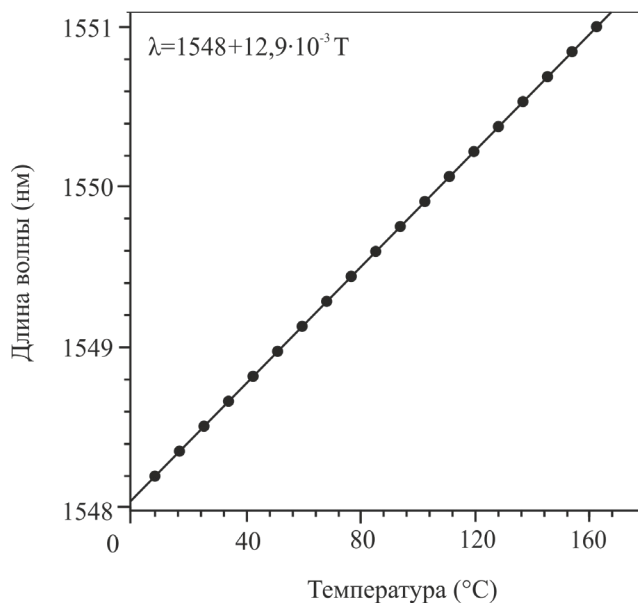


Рис. 3. Зависимость длины волны резонанса ВБР от воздействия температуры

$$\rho_e = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (4)$$

где $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$ — компоненты упругооптического тензора, $n = 1,482$ — ПП сердцевины, а $\nu = 0,16$ — коэффициент Пуассона. Экспериментальные результаты исследования смещения длины волны отражения ВБР λ_{B0} от деформации (растяжение/сжатие) представлены на рис. 2 [8].

Второе слагаемое в выражении (2) отражает влияние внешней температуры на оптоволокно и ВБР. Смещение брэгговской длины волны λ_B при изменении температуры ΔT может быть записано как:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (\alpha + \xi) \Delta T, \quad (5)$$

где $\alpha = (1/\Lambda)(\delta\Lambda/\delta T)$ — коэффициент термического расширения (для кварца $\alpha = 0,55 \cdot 10^{-6}$); $\xi = (1/n)(\delta n/\delta T)$ — термооптический коэффициент (для волокон с добавками германия примерно равный $8,6 \cdot 10^{-6}$). Учет вышеприведенных данных позволяет уравнение (5) преобразовать в следующее расчетное уравнение:

$$\lambda = 1548 + 12,9 \cdot 10^{-3} T, \quad (6)$$

при учете температурного сдвига ВБР в одномодовом оптическом волокне, равном $\sim 13,7$ пм/°С. На рис. 3 показана расчетная зависимость резонансной длины волны ВБР от влияния температуры на оптоволокно [8].

Оценка отраженных сигналов позволяет преобразовать оптоволокно фактически в набор виртуальных микрофонов, последовательно размещенных в волоконно-оптическом кабеле. Использование таких датчиков обуславливает принципиальную пригодность оптоволоконных технологий для слежения за техническим состоянием подвижного состава, в частности для определения дефектов деталей и узлов вагонов на ходу поезда и выявления предаварийных ситуаций [9–14]. Измеряемые полезные сигнатуры ВБР могут быть улучшены путем перемещения кабеля к источнику физического воздействия на него, то есть к рельсам железнодорожной линии. Эта методика рассмотрена в следующем разделе.

2. Совершенствование технологии DAS

На основе технологии DAS фирмой Frauscher Sensortechnik GmbH (Austria) разработана система дистанционного акустического зондирования FAS (Frauscher Acoustic Sensing). Структурная схема FAS, приведенная на рис. 4, состоит из: оптического волокна, уложенного вдоль железнодорожного пути; оптического модуля, посылающего лазерные импульсы в оптоволокно и

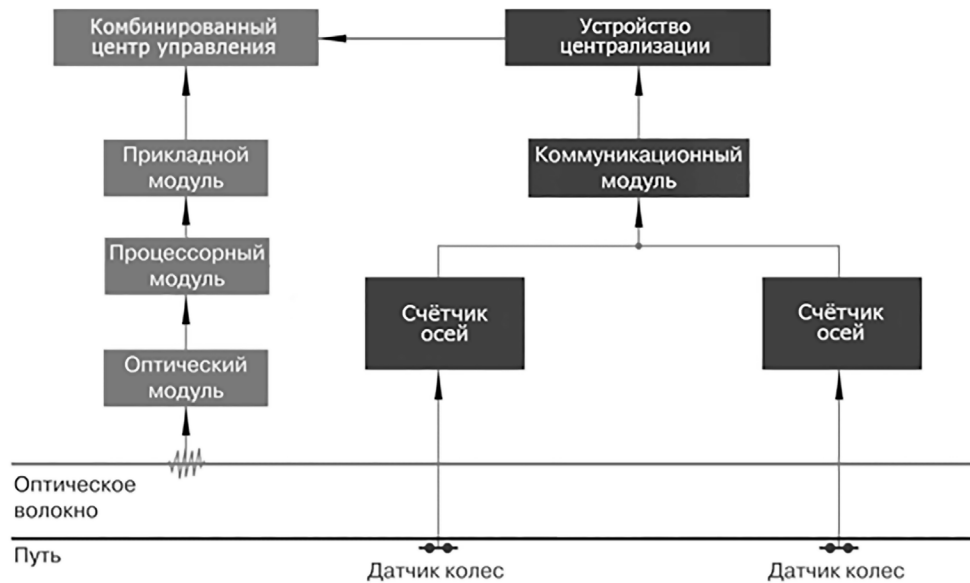


Рис. 4. Структурная схема обобщенной системы FAS и устройства централизации

выделяющего сигналы обратного рассеяния; процессорного модуля, преобразующего выделенные сигналы в спектры мощности и классифицирующего зарегистрированные события; прикладного модуля, определяющего виды дефектов и передающего информационные пакеты для отображения информации на мониторе многофункционального центра управления [11]. К недостаткам системы FAS с такой структурой следует отнести относительно невысокую точность в определении местоположения контролируемого поезда и отсутствие возможности определения координат вагонов с дефектными деталями.

Для локализации вагонных осей с дефектами, а также определения порядкового номера вагона в поезде и номера оси в вагоне предложено использовать отметчики прохода колес подвижного состава [13]. Система счета осей, приведенная в левой части рис. 4, состоит из датчиков колес, счетчиков осей, коммуникационного модуля и устройства централизации. Применение специальной схемы работы счетчиков импульсов дает возможность осуществлять счет физических единиц вагонов независимо от числа осей в них, а также фиксировать отдельные оси в вагоне. Совместное действие комбинированного центра управления системы FAS и устройства централизации для счета вагонных осей конкретизирует сведения о наличии дефектов в контролируемом подвижном

составе и однозначно фиксирует дефектные оси [7–9]. Такое объединение двух систем позволяет создать модернизированный вариант системы DAS, отвечающий выполнению необходимых условий обеспечения безопасности движения поездов. Увязка модернизированной системы DAS с информационно-измерительной Автоматизированной системой контроля подвижного состава (АСК ПС) не представляет сложности из-за наличия в ней соответствующего программного обеспечения и наличия 15 свободных каналов для обработки дискретных информационных сигналов [4].

Алгоритмы, разработанные на основе специальных аналого-цифровых преобразователей и схемах цифровой фильтрации [15–17], позволяют классифицировать выявляемые дефекты в контролируемом подвижном составе [15, 16]. В режиме непрерывного слежения за техническим состоянием подвижного состава оперативно выявляются дефекты в виде ползунов на колесах, а также процессы начинающегося разрушения боковых рам вагонных тележек, относящихся к наиболее опасным аварийным ситуациям. Дополнительно осуществляется контроль излома оси колесной пары или колеса, фиксация трещин в рельсах. Система пользовательского интерфейса формирует оперативную информацию о дефектах, далее события классифицируются, и полученная информация в согласованном формате передается в АСК ПС [18, 19].



Рис. 5. Технические конструктивы волоконно-оптического кабеля

3. Оценка условий работоспособности и регулировки DAS на участке железнодорожной линии

Для определения условий работоспособности системы DAS на опытном участке железной дороги оптоволоконный кабель уложен в землю, в качестве распределенной акустической сборки датчиков используется свободный световод кабеля. Технические конструктивы одномодового волоконно-оптического кабеля показаны на рис. 5. Отмечена частота дискретизации для обратного сигнала рассеяния, равная 2,5 кГц. Установлено, что пространственное разрешение чувствительных элементов акустических датчиков оптического волокна может достигать величины 10 м. Надежная фиксация сигналов отражающих событий в волоконно-оптическом кабеле возможна при протяженности контролируемого железнодорожного участка до 40 км [20].

При настроечных и регулировочных работах осуществлялось исследование отражающих дефектных событий с определением координат. При длине оптоволоконка, равной, например, 24 км, предполагается действие 2400 независимых акустических датчиков, последовательно размещенных вдоль кабеля. Это может обеспечить фактически непрерывный мониторинг всего 24-километрового участка железнодорожного пути. На рис. 6 представлена рефлектограмма с фиксацией отражающих событий в виде треугольных импульсов

на 3 и 6 километрах участка, при длине волны 1540 нм. Амплитуда сигналов составила -3 дБ. Для качественной работы устройства амплитуда отражающих сигналов не должна превышать 1 дБ. Общее затухание линии не должно превышать 10 дБ [20, 21]. На конце волокна, на 20-м км, зафиксировано мощное отражающее событие помехи с амплитудой -8 дБ. Для предотвращения этих влияний и согласования параметров на конце волокна устанавливается согласующий терминальный блок [7].

После подключения терминального блока и регулировки рефлектограмма приобретает вид (рис. 7), подтверждающий готовность системы DAS к проведению измерений. В верхней правой части рефлектограммы показано отражение сигнала от подключения двухкилометрового патч-корда (удлинителя, для исключения зоны нечувствительности рефлектометра) к основному волокну. В процессе испытаний регистрировался контроль местоположения поездов с измерением скорости, а также осуществлялся счет осей и вагонов. После аналого-цифрового преобразования и цифровой фильтрации по специальному алгоритму результаты контроля отображаются на мониторе комбинированного центра управления [13].

На рис. 8 приведен пример информационного окна системы FAS [13] с сообщением о выявленном дефекте в виде ползуна на колесе (Wheel Flat) в контролируемом поезде с номером 1423 (Train 1423) на 58 километре (Position

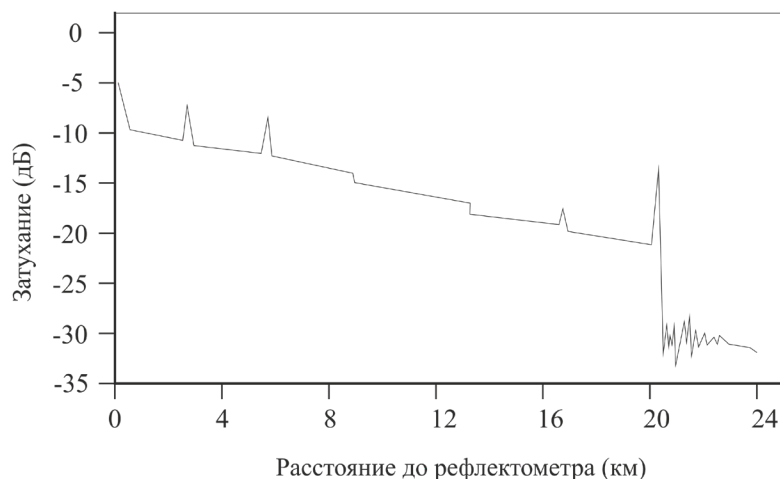


Рис. 6. Рефлектограмма для настройки системы DAS

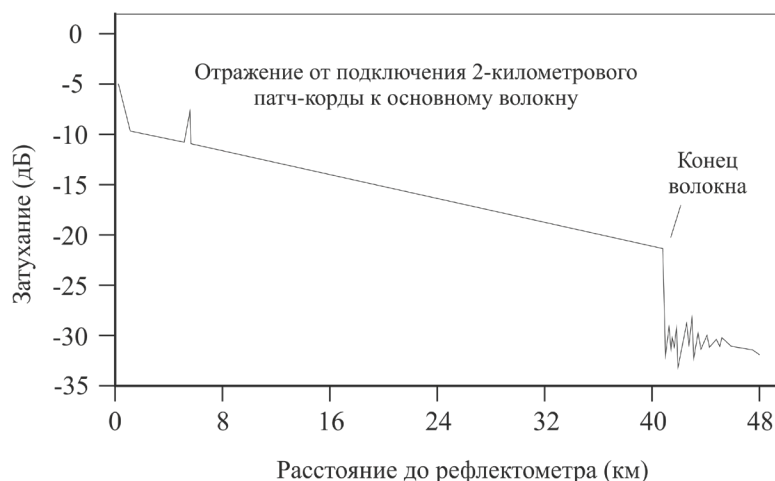


Рис. 7. Рефлектограмма системы DAS после регулировки

58 9875 m) железнодорожного участка (показано красной линией), а также о местонахождении второго поезда с номером 1677 (Train 1677) на 35 километре (Position 35 891 m) (показано зеленой линией). Для обоих поездов указаны фактические скорости движения 72 и 86 км/ч соответственно, а также время фиксации результатов контроля 09:25 am и 09:14 am.

Для обоих сообщений указаны географические координаты местоположения поездов — $48^{\circ} 21' 47.52''$ N $13^{\circ} 34' 75.48''$ E и $48^{\circ} 21' 58.37''$ N $13^{\circ} 34' 51.23''$ E соответственно. В приведенном информационном сообщении отсутствуют сведения о местоположении вагона с дефектом в поезде, что подтверждает ранее сформированный вывод о необходимости дополнения системы FAS устройством регистрации прохода колес, позволяющим однозначно фиксировать дефектные оси.

На рис. 9 приведен пример скриншота сигнала акустического изображения ползуна на колесе при движении груженого вагона [14]. На оси абсцисс отмечен путь, проходимый поездом, а на оси ординат приведены временные отметки движения поезда. Помимо полезного сигнала зафиксированы помехи. Характеристика изображения отражает зависимость сигнала от скорости движения поезда. Фрагмент изображения сигнала при движении поезда с увеличенной скоростью расположен в правой верхней части рис. 9.

4. Размещение устройств DAS на Белорусской железной дороге

На основании проведенных исследований разработана схема размещения устройств DAS на двухпутных и однопутных линиях Белорусской железной дороги, приведенная на рис. 10.

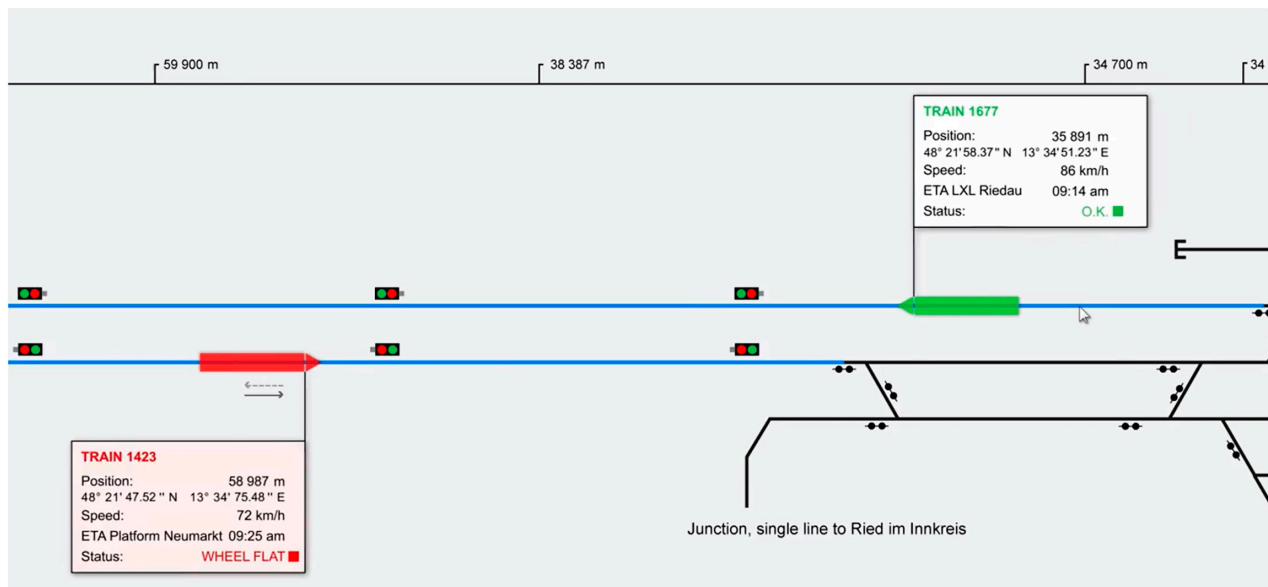


Рис. 8. Информационное окно системы FAS с указанием дефекта в виде ползуна на колесе в проконтролированном поезде

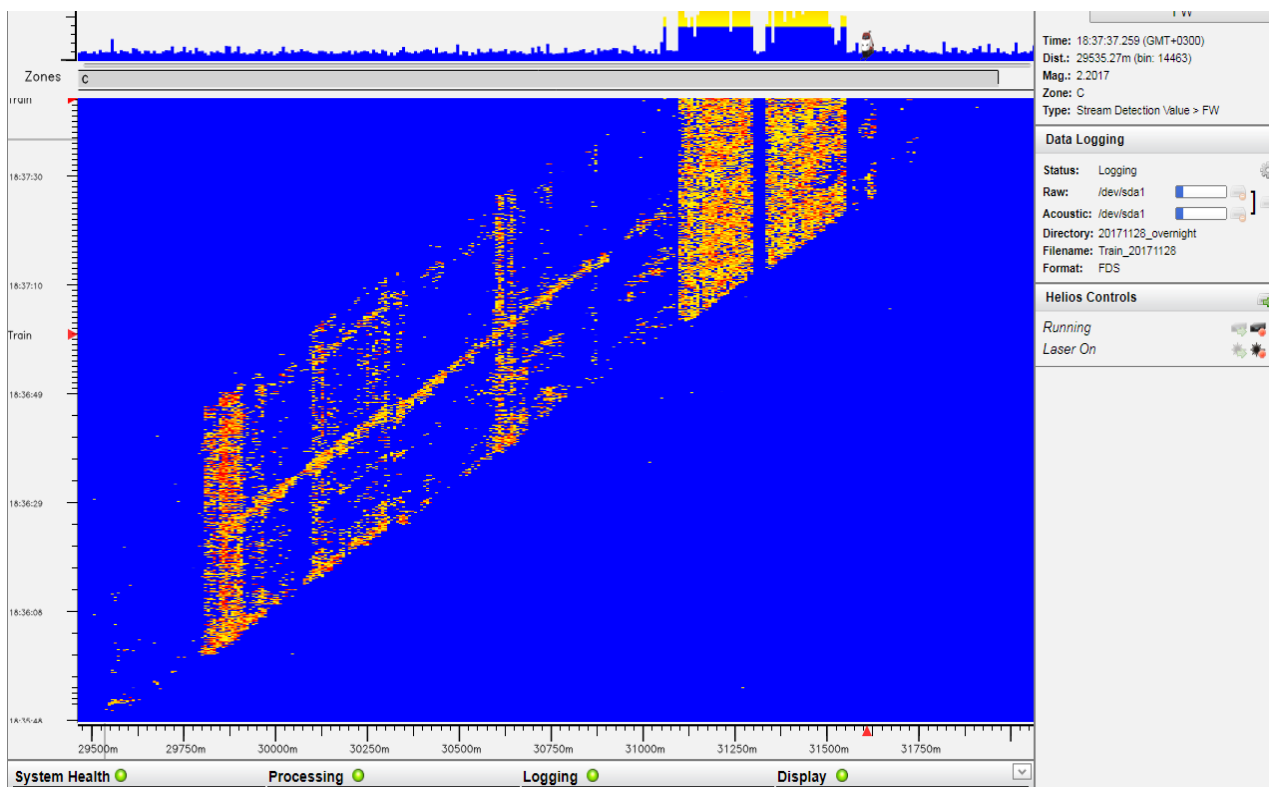


Рис. 9. Скриншот сигнала изображения ползуна на колесе при движении вагона

Участки дороги, оснащаемые устройствами DAS, показаны в увязке с Автоматизированными рабочими местами пунктов технического обслуживания (АРМ ПТО). Представлены АРМы промежуточных линейных пунктов контроля АРМ ЛПК и АРМы центральных пунктов контроля

АРМ ЦПК узловых станций, взаимосвязанных с устройствами DAS в едином информационно-измерительном комплексе системы АСК ПС.

В таблице представлены цифровые показатели размещения оптоволоконного кабеля системы DAS по отделениям Белорусской железной

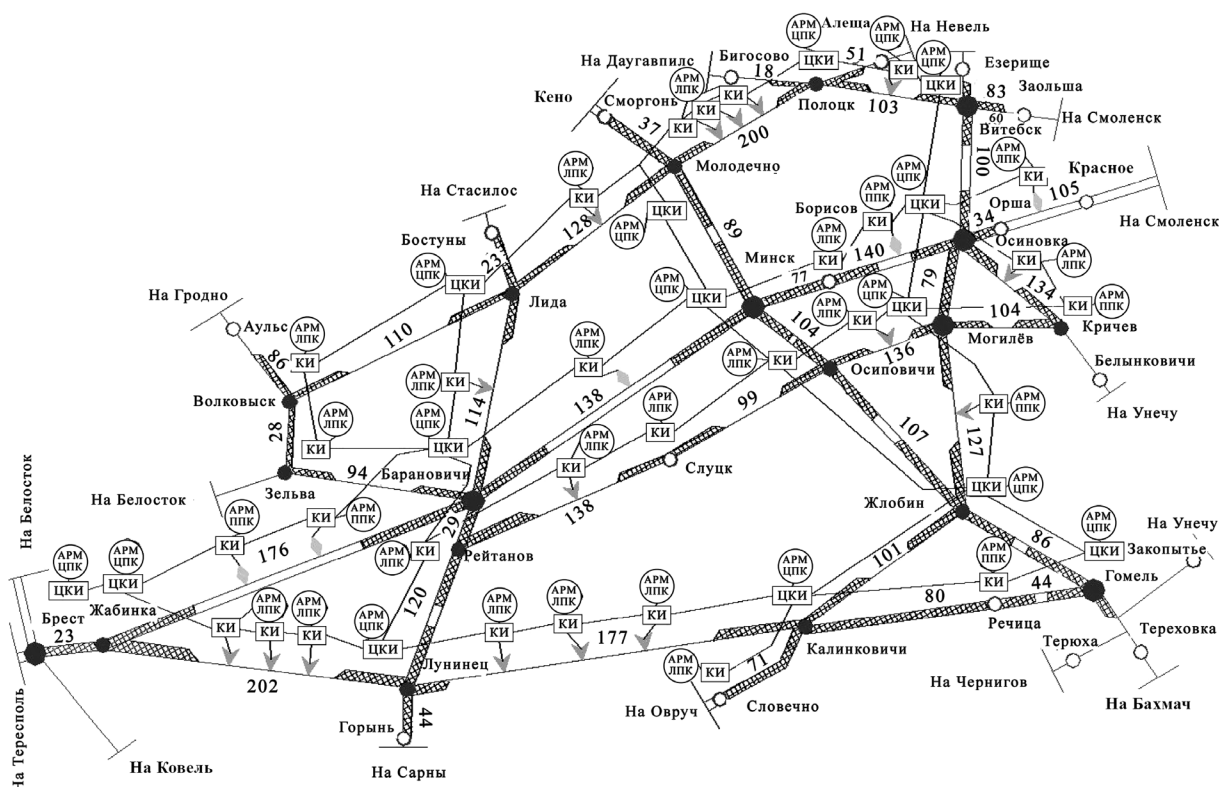


Рис. 10. Схема размещения устройств DAS на полигоне Белорусской железной дороги

Размещение оптоволоконного кабеля системы DAS на полигоне Белорусской железной дороги

Название отделений дороги	Общая протяженность железнодорожных линий, км	Протяженность железнодорожных линий, оснащаемых оптоволоконным кабелем, км	Неконтролируемые участки железнодорожных линий, км
НОД-1 Минск	894	596	298
НОД-2 Барановичи	911	608	303
НОД-3 Брест	214	107	107
НОД-4 Гомель	635	440	195
НОД-5 Могилев	720	517	203
НОД-6 Витебск	528	320	208
Итого в масштабе дороги	3902	2588	1304

дороги (НОД-1 — НОД-6) с указанием участков дороги, охваченных системой контроля.

Длина исследованных железнодорожных линий дороги составила 3902 км. Из них длина участков, охватываемых системой DAS, составила 2588 км, что в процентном отношении составило 64 %. Непрерывная обработка результатов измерений при движении поезда позволяет немедленно выявлять дефектные

колеса с величинами ползунов от 1,0 мм и более, создающие аварийную ситуацию. Также оперативно диагностируются процессы начинающегося излома боковой рамы вагонной тележки.

Особым преимуществом непрерывного отслеживания технического состояния поезда в движении является повышение точности измерений при движении поезда. Однако при

использовании оптоволоконного кабеля, уложенного в грунт или кабельный коллектор на двухпутных участках железнодорожных линий, а также на путях станций, отмечены сложности с фильтрацией полезных сигналов на фоне помех. Большой точности измерений можно достичь при монтаже оптоволоконного кабеля на подошве рельсов, возле пружинных креплений рельсов к шпалам, с помощью специальных пластмассовых клипс. Эффективная зона чувствительности повышается в этом случае в 5 раз (с 10 до 2 метров). Относительно невысокая стоимость оптоволоконного кабеля, пластмассовых элементов крепления и монтажа системы DAS в целом обуславливают перспективность этого проекта.

Наличие соответствующего программного обеспечения в системе АСК ПС для подключения системы DAS позволит в режиме совместной работы браковать вагоны без предварительного визуального контроля осмотрщиками. Результаты полученной и обработанной информации служат основой планирования и реализации мероприятий для устранения выявленных дефектов в проконтролированных поездах. Это открывает широкие перспективы для роста эффективности контроля технического состояния подвижного состава и инфраструктуры железнодорожных линий.

Заключение

Исследованы возможности использования волоконно-оптических линий, проложенных вдоль железнодорожных путей, в качестве датчиков для определения дефектов в подвижном составе и инфраструктуре железнодорожных линий. Для повышения точности предложена методика дополнения технологии DAS метчиками прохода колес.

На основании проведенных исследований разработана схема размещения устройств DAS на двухпутных и однопутных железнодорожных линиях Белорусской железной дороги. Преимуществом предложенной системы является многократное непрерывное измерение дефектов подвижного состава, в отличие от эксплуатируемых устройств и систем диагностики, осуществляющих однократное измерение

температуры буксовых узлов или выявление заторможенных колес с интервалом 30–35 км в попутном направлении движения. Один кабельный распределенный акустический сенсор заменяет собой тысячи точечных датчиков и снижает потребность в отдельных системах для мониторинга технического состояния подвижного состава.

Существенно повышается безопасность движения в режиме реального времени за счет точного определения местоположения влияющих событий вдоль волоконно-оптического кабеля.

Использование системы распределенного акустического зондирования обеспечивает немедленное обнаружение излома боковых рам вагонных тележек, относящегося к наиболее опасному дефекту, приводящему к сходу подвижного состава с рельсов. ✂

Библиографический список

1. Миронов А. А. Перспективные направления совершенствования средств контроля КТСМ-02 и АСК ПС / А. А. Миронов // Автоматика, связь, информатика. — 2009. — № 1. — С. 38–41.
2. Гондоров В. А. Современные средства диагностики подвижного состава на ходу поезда / В. А. Гондоров // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2017. — № 4. — С. 36–37.
3. Наговицын В. С. Комплексная информационно-измерительная система технического диагностирования подвижного состава / В. С. Наговицын, А. А. Калмыков, В. И. Елфимов // Автоматика, связь, информатика. — 1999. — № 10. — С. 46–48.
4. Бурченков В. В. Автоматизация технического контроля и диагностики подвижного состава железных дорог: монография / В. В. Бурченков; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. — Гомель: БелГУТ, 2020. — 254 с.
5. Бурченков В. В. Совершенствование технологии работы сортировочных станций на основе дистанционного акустического зондирования / В. В. Бурченков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — Дніпро. — 2020. — № 1(85). — С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199482>.
6. Никитин А. Б. Результаты исследования технических средств контроля целостности поездов / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 4. — С. 411–434. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434.
7. Алюшина С. Г. Волоконные решетки Брэгга с фазированной структурой в распределенных информационно-измерительных системах / С. Г. Алюшина, П. Е. Денисенко, О. Г. Морозов и др. // Нелинейный мир. — 2011. — Т. 9. — № 8. — С. 522–528.

8. *Kunhua W.* Optimized synthesis of fiber Bragg gratings with triangular spectrum for wavelength-interrogation application / W. Kunhua, Y. Lianshan, W. Pan // *Optical Engineering*. — 2011. — Vol. 50(5). — Pp. 054003-1-054004.
9. *Othonos A.* Fiber Bragg gratings / A. Othonos // *Review of Scientific Instrument*. — 1997. — V. 68. — № 12. — Pp. 4309–4341.
10. *Morozov O. G.* Methodology of symmetric double frequency reflectometry for selective fiber optic structures / O. G. Morozov, D. L. Aybatov, V. P. Prosvirin et al. // *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. — 2008. — Vol. 7026. — P. 702601.
11. *Розенбергер М.* Распределенное акустическое зондирование как основа для железнодорожных приложений / М. Розенбергер, А. Халл // *Железные дороги мира*. — 2016. — № 12 — С. 57–65.
12. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / Пер. с англ.; под ред. Г. Теера, С. Власенко. — М.: Интекст, 2010. — 496 с.
13. *Бахтиярова Е. А.* Технология будущего: распределенное акустическое зондирование DAS в режиме реального времени / Е. А. Бахтиярова, Т. О. Чигамбаев, К. М. Сансызбай // *Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика: материалы ХLI Междунар. науч.-практ. конф.* — КазАТК им. М. Тынышпаева. — 2017. — С. 49–54.
14. *Дмитриев С. А.* Инновационные волоконные технологии для железнодорожного транспорта / С. А. Дмитриев // *Транспорт Российской Федерации*. — 2016. — № 1(62). — С. 26–27.
15. *Баранов Л. А.* Оценки погрешности и помехоустойчивости тракта аналого-цифрового преобразования в системах автоматического контроля и управления / Л. А. Баранов // *Электротехника*. — 2017. — № 9. — С. 29–36.
16. *Баранов Л. А.* Влияние устройств выборки и хранения на точность аналого-цифрового преобразования / Л. А. Баранов // *Автоматика на транспорте*. — 2018. — Т. 4. — № 2. — С. 241–263.
17. *Никитин А. Б.* Принципы безопасного сопряжения с объектами в микропроцессорных системах железнодорожной автоматики / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин, В. А. Соколов, Н. А. Журавлева // *Автоматика на транспорте*. — 2019. — Т. 5. — № 2. — С. 186–201. — DOI: 10.20295/2412-9186-2019-2-186-201.
18. *Pohl P.* Волоконно-оптические датчики на железных дорогах Германии / P. Pohl, M. Schubert // *Железные дороги мира*. — 2017. — № 12. — С. 64–68.
19. *Ефремов А.* Возможности применения технологии DAS на железных дорогах Северной Америки / А. Ефремов // *Железные дороги мира*. — 2019. — № 1. — С. 64–73.
20. *Willis M. E.* Quantitative quality of distributed acoustic sensing vertical seismic profile data / M. E. Willis, D. Barfoot, A. Ellmauthaler et al. // *The Leading Edge*. — 2016. — Vol. 35. — I. 7. — Pp. 562–648. — DOI: <https://doi.org/10.1190/tle35070605.1>
21. *Yao J. P.* Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors / J. P. Yao // *Fiber and Integrated Optics*. — 2015. — Vol. 34. — Pp. 230–242.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 1, pp. 90–100
 DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-01-90-100

Rolling Stock Monitoring Technology Based on Remote Acoustic Sensing

Information about authors

Baranov L. A., Second Doctoral Degree in Technical Sciences, Professor, Head of Department¹. E-mail: baranov.miit@gmail.com

Burchenkov V. V., PhD in Technical Sciences, Assistant Professor². E-mail: lenadva@tut.by

¹ Russian University of Transport (MIIT), Department «Information Management and Protection», Moscow
² Belarusian State University of Transport, Department «Wagons», Gomel, Belarus

Abstract: The functionality of information-measuring systems for remote detection of faulty parts of the undercarriage of cars in motion is considered. The features of the use of fiber-optic cables laid along the railway tracks as sensors for detecting defects in the rolling stock and infrastructure of railway lines are evaluated. The functional features of the influence of external physical influences impact on the length of the reflected wave fiber Bragg gratings. The possibility of using remote acoustic sensing to determine defects in parts and assemblies of rolling stock while the train is in motion is shown, the possibilities of joint application of the remote acoustic sounding technology with axle counters and a wheel passage registration system are noted. An assessment of the conditions for ensuring the operability and adjustment of a distributed fiber-

optic line of sensors for a railway section is proposed. A scheme for the planned placement of remote acoustic sounding devices at the training ground of the Belarusian Railways has been developed. The possibility of immediate detection of defective wheelsets with a maximum allowable value of sliders exceeding 1.0 mm, as well as a break in the side frame of a wagon bogie to prevent dangerous emergencies, has been established. A method is proposed for continuous monitoring of the technical condition of rolling stock in motion, providing increased control over the serviceability of parts and units of the rolling stock.

Key words: rolling stock; railway lines; diagnostic systems; fiber optic cables; remote acoustic sensing; distributed fiber optic sensors; axle counters; fiber Bragg grating.

References

1. Mironov A. A. Perspektivnye napravleniya sovershenstvovaniya sredstv kontrolya KTSM-02 i ASK PS [Perspective directions for improving the means of control KTSM-02 and ASK PS]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics]. 2009, I. 1, pp. 38–41.
2. Gondorov V. A. Sovremennye sredstva diagnostiki podvizhnogo sostava na khodu poezda [Modern means of diagnosing rolling stock on the train]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo* [Wagons and carriage economy]. 2017, I. 4, pp. 36–37.
3. Nagovitsyn V. S. Kompleksnaya informatsionno-izmeritel'naya sistema tekhnicheskogo diagnostirovaniya podvizhnogo sostava [Integrated information and measuring system for technical rolling stock]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics]. 1999, I. 10, pp. 46–48.
4. Burchenkov V. V. Avtomatizatsiya tekhnicheskogo kontrolya i diagnostiki podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Automation of technical control and diagnostics of railway rolling stock]. *M-vo transp. i kommunikatsiy Resp. Belarus'*

- Belorus. gos. un-t transp* [M-in transp. and communications Rep. Belarus, Belarus. state transp.]. Gomel': BelGUT Publ., 2020. 254 p.
5. Burchenkov V. V. Sovershenstvovanie tekhnologii raboty sortirovochnykh stantsiy na osnove distantsionnogo akusticheskogo zondirovaniya [Improving the technology of marshalling yards based on remote acoustic sensing]. *Visn. Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im akad. V. Lazaryana* [Visn. Dnipropetr. nat. un-tu zalizn. transp. im acad. V. Lazaryan]. 2020, I. 1 (85), pp. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199482>.
 6. Nikitin A. B., Kushpil' I. V. Rezul'taty issledovaniya tekhnicheskikh sredstv kontrolya tselostnosti poezdov [The results of the study of technical means of monitoring the integrity of trains]. *Avtomatika na transporte* [Automatic on transport]. 2020, V. 6, I. 4, pp. 411–434. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434.
 7. Alyushina S. G. Volokonnye reshetki Bregga s fazirovannoy strukturoy v raspredelennykh informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh [Fiber Bragg gratings with a phased structure in distributed information-measuring systems]. *Nelineyny mir* [Nonlinear world]. 2011, V. 9, I. 8, pp. 522–528.
 8. Kunhua W. Optimized synthesis of fiber Bragg gratings with triangular spectrum for wavelength-interrogation application / Kunhua Wen, Lianshan Yan, WeiPan // *Optical Engineering*. — 2011. — Vol. 50(5). — P. 054003-1-054004.
 9. Othonos A. Fiber Bragg gratings / A. Othonos // *Review of Scientific Instrument*. — 1997. — V. 68. — № 12. — P. 4309–4341.
 10. Morozov O. G. Methodology of symmetric double frequency reflectometry for selective fiber optic structures / O. G. Morozov, D. L. Aybatov, V. P. Prosvirin, A.A. Talipov, O. G. Natanson // *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. — 2008. — V. 7026. — P. 702601.
 11. Rozenberger M. Raspredelennoe akusticheskoe zondirovanie kak osnova dlya zheleznodorozhnykh prilozheniy [Distributed acoustic sensing as a basis for railway applications]. *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of the world]. 2016, I. 12, pp. 57–65.
 12. *Sistemy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznykh dorogakh mira* [Systems of automation and telemechanics on the railways of the world]. Moscow: Intekst Publ., 2010. 496 p.
 13. Bakhtiyarova E. A. Tekhnologiya budushchego: raspredelennoe akusticheskoe zondirovanie DAS v rezhime real'nogo vremeni [Technology of the future: distributed acoustic sensing DAS in real time]. «Innovatsionnye tekhnologii na transporte: obrazovanie, nauka, praktika», *materialy XLI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., — KazATK im. M. Tynyshpaeva* ["Innovative technologies in transport: education, science, practice", materials of the XLI Intern. scientific-practical. conf., — KazATK named after. M. Tynyshpaeva]. 2017, pp. 49–54.
 14. Dmitriev S. A. Innovatsionnye volokonnye tekhnologii dlya zheleznodorozhnogo transporta [Innovative fiber technologies for railway transport]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2016, I. 1 (62), pp. 26–27.
 15. Baranov L. A. Otsenki pogreshnosti i pomekhoustoychivosti trakta analogo-tsifrovogo preobrazovaniya v sistemakh avtomaticheskogo kontrolya i upravleniya [Estimates of the error and noise immunity of the analog-to-digital conversion path in automatic control and management systems]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2017, I. 9, pp. 29–36.
 16. Baranov L. A. Vliyaniye ustroystv vyborki i khraneniya na tochnost' analogo-tsifrovogo preobrazovaniya [Influence of sampling and storage devices on the accuracy of analog-to-digital conversion]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2018, V. 4, I. 2, pp. 241–263.
 17. Nikitin A. B. Printsipy bezopasnogo sopryazheniya s ob'ektami v mikroprotsessornykh sistemakh zheleznodorozhnoy avtomatiki [Principles of safe interfacing with objects in microprocessor systems of railway automation]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2019, V. 5, I. 2, pp. 186–201. — DOI: 10.20295/2412-9186-2019-2-186-201.
 18. Pohl P. Volokonno-opticheskie datchiki na zheleznykh dorogakh Germanii [Fiber-optic sensors on German railways]. *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of the world]. 2017, I. 12, pp. 64–68.
 19. Efremov A. Vozmozhnosti primeneniya tekhnologii DAS na zheleznykh dorogakh Severnoy Ameriki [Possibilities of using DAS technology on the railways of North America]. *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of the world]. 2019, I. 1, pp. 64–73.
 20. Willis M. E., Barfoot D., Ellmauthaler A., Wu X., Barrios O., Erdemir C., Quinn D. Quantitative quality of distributed acoustic sensing vertical seismic profile data. *The Leading Edge*. — 2016. — Vol. 35. Iss. 7. — P. 562–648. DOI: <https://doi.org/10.1190/tle35070605.1>
 21. Yao J. P. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors // *Fiber and Integrated Optics*. — 2015. — Vol. 34. — P. 230–242.