

Вибродиагностика контактной подвески на линии Санкт-Петербург – Москва



Г. Ф. Насонов,
заместитель начальника
Центральной дирекции
инфраструктуры –
филиала ОАО «РЖД»
(по развитию системы
управления)



Г. В. Осадчий,
технический директор
ЗАО НТЦ
«Мониторинг мостов»



Д. В. Ефанов,
канд. техн. наук,
доцент Петербургского
государственного
университета путей
сообщения Императора
Александра I; член IEEE



Д. В. Седых,
инженер ЗАО НТЦ
«Мониторинг мостов»



Д. Н. Пристенский,
ведущий инженер
ООО «Мостовое бюро»



Рис. 1. Контактная подвеска на участке Торбино – Боровенка линии скоростного сообщения Санкт-Петербург – Москва

Организация непрерывного контроля состояния особенно важна для сооружений железнодорожной инфраструктуры, не имеющих резерва. Рассматриваются особенности одной из первых систем непрерывного мониторинга состояния контактной подвески в нашей стране. Приведены результаты экспериментов с датчиками вибродиагностики.

Россия – одна из немногих стран, где организовано скоростное железнодорожное сообщение, но нет развитых средств комплексного непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры. Системы непрерывного контроля стали популярным средством повышения отказоустойчивости объектов, представляющих собой неотъемлемую часть ответственных технологических процессов, к которым относится и перевозочный процесс на железнодорожном транспорте. Системы непрерывного мониторинга в ОАО «РЖД» позволяют организовать интеллектуальный контроль технического состояния объектов с возможностью фиксации предотказных состояний, а также снизить влияние человеческого фактора на процессы эксплуатации и технического обслуживания средств управления.

Постепенно системы непрерывного мониторинга проникают в железнодорожную инфраструктуру. В ОАО «РЖД» лучше разработаны системы мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики [1]. Их развитие и постоянное совершенствование продолжается более 20 лет: оптимизируются аппаратные и программные средства, повышается уровень автоматизации обработки диагностической информации, увеличиваются глубина диагностирования и достоверность диагноза, разрабатываются новые подходы к выбору точек подключения измерительных контроллеров и т. д. [2].

Средства мониторинга объектов только одного хозяйства автоматики и телемеханики не могут максимально эффективно обеспечивать безопасный и бесперебойный

пропуск поездов по железнодорожным линиям. Все объекты инфраструктуры взаимодействуют в комплексе, и отказы объектов одного хозяйства могут оказаться непосредственной причиной отказа в другом хозяйстве. Например, коды автоматической локомотивной сигнализации могут искажаться вследствие возникающих механических напряжений в тросах и проводах контактной подвески. Контроль данного параметра позволит исключить множество случаев сбоев, а значит, и нарушения в графике движения поездов.

Также в фокусе внимания находятся технические сооружения железнодорожной инфраструктуры, не имеющие 100%-ного резерва. Организация непрерывного мониторинга их состояния – один из эффективных подходов к решению задачи качественного функционирования указанных объектов.

К техническим средствам, непосредственно вовлеченным в перевозочный процесс и не имеющим резерва, относятся, например, элементы конструкции контактной подвески (рис. 1). Известно, что контактная подвеска функционирует в условиях тяжелых внешних воздействий, под влиянием тягового тока ее элементы нагреваются. Для обеспечения ее надежности при проектировании и строительстве предусматривают повышенные коэффициенты запаса прочности – от 2 до 4. Кроме того, контактную подвеску секционируют, т. е. разделяют на отдельные секции, изолированные в механическом и электрическом отношении друг от друга, что обеспечивает удобство ее эксплуатации.

В заданных условиях эксплуатации контактный провод имеет нормативное провисание и обеспечивает требуемое

качество съема тягового тока пантографом локомотива. При износе контактного провода изменяется натяжение проводов подвески и снижается качество съема тягового тока.

При организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения используют компенсированную контактную подвеску с блочно-грузовыми компенсаторами. Повышение натяжения проводов подвески существенно влияет на улучшение статических и динамических характеристик, увеличивает ее жесткость. Струны такой подвески при изменении температуры сохраняют вертикальное положение, смещаясь вправо или влево вместе с несущим тросом и контактными проводами.

Многие неисправности контактной сети (более 75 % отказов) связаны именно с отказами контактной подвески: с износом контактного провода, с провисанием подвески, с обрывами струн и т. д. Контроль технического состояния элементов контактной подвески включает их техническое обслуживание и ремонт. Кроме того, в России реализуется периодический мониторинг контактной подвески с использованием вагона-лаборатории испытаний контактной сети. Известны такие способы периодического мониторинга, как оценка износа и провисания проводов на основе видеосъемки, оценка степени износа контактного провода на основе применения матричных вихретоковых преобразователей, размещаемых на токосъемной лыже вагона-лаборатории, регистрация высоты контактного провода при помощи оптического устройства, размещаемого на токоприемнике подвижной единицы, и т. д.

На железных дорогах ряда стран Европы и Азии используются системы непрерывного мониторинга элементов конструкции контактной подвески [3–6]. Однако зарубежные технические решения по мониторингу на железных дорогах России неприменимы вследствие коренных различий в конструкции контактной подвески. Разработаны типовые проектные решения для отечественных контактных сетей: КС-160, КС-200 и КС-250. В их основе лежит блочно-полиспастный механизм. За рубежом для натяжения контактной подвески, например для высокоскоростных линий, используют механизм зубчатого натяжения и компенсаторы барабанного типа.

Рассмотрим особенности одной из первых систем непрерывного мони-

торинга технического состояния контактной подвески на железных дорогах России, развивающейся с конца 2000-х годов [7]. Функциональной особенностью системы стала возможность диагностировать виброускорения в тросах и проводах контактной подвески.

Средства вибродиагностики системы непрерывного мониторинга контактной подвески

Первыми объектами мониторинга стали тросы и провода контактной подвески на участке Любань – Бабино скоростного движения Санкт-Петербург – Москва Октябрьской железной дороги. На четырех анкерных участках по 1-му и 2-му пути в створе были установлены аппаратно-программные средства вибродиагностики системы непрерывного мониторинга контактной подвески. На указанном участке установлена цепная эластичная компенсированная подвеска типа КС-200-7. Разрешена скорость движения поездов не более 200 км/ч. Для реализации такой скорости движения применены бронзовые контактные провода сечением 120 мм² с повышенным натяжением 20 кН, мерные токопроводящие струны из гибких бронзовых тросов. Токопроводящая арматура изготовлена из кремнисто-никелевой бронзы БрКН1-3 методом горячей штамповки и характеризуется повышенной механической прочностью и электропроводностью. Горизонтальные изолированные консоли выполнены из стальных или алюминиевых бесшовных труб с арматурой из высокопрочного чугуна ВЧ-40, нержавеющей стали или алюминиевых сплавов. Дополнительные фиксаторы из алюминиевых труб и все зажимы на контактном проводе имеют минимальную массу, вследствие этого улучшается взаимодействие контактной подвески с токоприемниками. Металлические двухшвеллерные опоры в три-четыре раза легче, чем равные им по мощности железобетонные. Все металлоконструкции из стали и чугуна имеют защитное цинковое покрытие.

Система непрерывного мониторинга тросов и проводов контактной подвески включает в себя несколько уровней:

- 1) сбора и первичной обработки диагностической информации (непосредственно датчики съема диагностической информации и первичной их обработки, а также ретрансляторы сигналов);
- 2) беспроводной передачи данных на линейный концентратор;

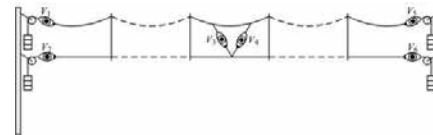


Рис. 2. Схема установки диагностических устройств на анкерных участках

- 3) энергоснабжения и автономного питания диагностических устройств;
- 4) передачи данных от линейных концентраторов в центр мониторинга по проводному тракту;
- 5) аппаратно-программных средств концентратора поста и центра мониторинга.

На каждом анкерном участке установлено по шесть диагностических устройств, закрепленных на изолированных участках между полиспастом и изоляторами и в районе средней анкеровки (рис. 2). Таким образом, всего для реализации непрерывного мониторинга использованы 24 диагностических устройства.

Каждое диагностическое устройство включает в себя датчики вибродиагностики и температуры, автономный источник питания, микропроцессорное устройство для первичной аналого-цифровой обработки информации с датчиков блока, устройство радиосвязи между блоком и размещаемым на линейном посту промежуточным концентратором диагностической информации. Структурная схема диагностического устройства приведена на рис. 3. Следует отметить, что при необходимости аппаратно-программные средства диагностического устройства можно легко расширить.

В качестве вибродатчика использован трехосевой программируемый

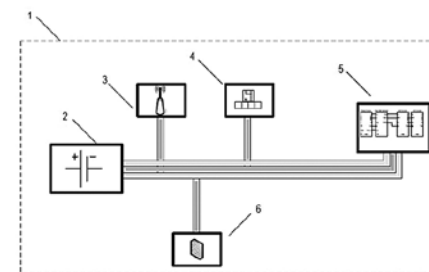


Рис. 3. Структура блока сбора и обработки информации:

- 1 – блок сбора и передачи информации;
- 2 – автономный источник питания;
- 3 – устройство радиосвязи;
- 4 – вибродатчик и датчик температуры;
- 5 – микропроцессорное устройство;
- 6 – элемент сопряжения с системой передачи данных

MEMS-акселерометр с цифровым выходом и встроенным температурным датчиком, имеющим следующие интеллектуальные функции:

- 1) расширенные функции «свободное падение» и «пробуждение»;
- 2) функцию прямого распознавания;
- 3) встроенный высокочастотный фильтр.

Приведем основные характеристики акселерометра:

- 1) цифровые SPI- и I2C-интерфейсы, два независимых полностью программируемых сигнала прерываний;
- 2) программируемые пользователем пределы измерений ускорений: $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$;
- 3) ток потребления в нормальном режиме менее 0,3 мА;
- 4) ток потребления в экономичном режиме менее 10 мкА;
- 5) ток потребления в спящем режиме менее 1 мкА;
- 6) разрешение лучше, чем 1 мг;
- 7) очень высокая температурная стабильность: $0,2 \text{ mg}/^\circ\text{C}$;
- 8) расширенный диапазон рабочих температур: $-40\dots+85 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 9) встроенная функция самотестирования;
- 10) высокая устойчивость к ударам 10 000 g при 0,1 мс.

Результаты мониторинга передаются от диагностических устройств в концентратор информации по радиоканалу на частоте 868,7 МГц. В зависимости от расположения и особенностей конкретного анкерного участка информация передается напрямую или через ретрансляторы сигналов (рис. 4).

Частотный диапазон получил все необходимые согласования в Центральной станции связи (ЦСС) ОАО «РЖД» и рекомендован для передачи диагностической информации службы электрификации и энергоснабжения, а также других хозяйств. Для оптимальной передачи данных разработан собственный протокол передачи сообщений, что в связке с имеющейся аппаратной частью позволяет достичь следующих уникальных характеристик [8]:

- 1) высокая энергетическая эффективность (до полутора лет работы от автономных источников питания при температуре от -40 до $+60 \text{ }^\circ\text{C}$);
- 2) возможность использования солнечных батарей как для датчиков системы, так и для ретрансляторов;
- 3) возможность подключения внешних датчиков в дополнение к встроен-

ным датчикам температуры, вибраций и магнитного поля;

- 4) настройка маршрутов передачи данных до концентраторов системы по различным сценариям: через ретрансляторы сигнала, соседние датчики, напрямую к концентратору и т. д.;
- 5) автоматическое динамическое перестроение маршрутов в случае отказа отдельных узлов сети; возможна отправка данных через соседние ретрансляторы и даже через соседние датчики, которые временно становятся ретрансляторами для передачи сообщений;
- 6) настраиваемые приоритеты сообщений в системе: авария, диагностирование системы, обновление программного обеспечения;
- 7) гарантированная передача сообщений между устройствами;
- 8) автоматическое обновление программного обеспечения аппаратных средств системы в полностью автоматическом режиме;
- 9) непрерывный мониторинг состояния аппаратных средств системы, уровней сигнала, характеристик среды радиопередачи.

При передаче данных расстояние между датчиками может достигать 2 км. Скорость передачи данных позволяет обрабатывать данные от 250 датчиков с использованием двух концентраторов. Система имеет резервы по увеличению скорости и дальности передачи данных при использовании других мощностных характеристик и более высоких частот радиопередающего модуля.

Обеспечение достоверной передачи данных в описываемой системе становится особенно актуальным. Это обусловлено тем, что тракт передачи данных между источником информации (датчиком) и концентратором использует собственный протокол, объекты функционируют в условиях электромагнитных помех. К тому же трафику присущ ряд особенностей: должны учитываться скорость передачи, объем данных и топология сети. Диагностический прибор, работающий от автономного источника, требует минимизации энергозатрат. Это накладывает ограничения на длину пакета передаваемого сообщения и на способ обеспечения надежной передачи информации. Для защиты диагностической информации, обеспечения ее достоверной передачи в линейные концентраторы и реализации стратегии самодиагностирования встроенными аппаратно-программны-

ми средствами системы мониторинга нами были разработаны специальные систематические коды с высокой кодовой скоростью и обнаруживающей способностью [9, 10]. На основе анализа был выбран оптимальный вариант кодирования с учетом особенностей организованной системы мониторинга. Отметим, что кроме обозначенного приложения в системах мониторинга с использованием радиоканалов передачи данных разработанные коды можно эффективно применять при организации систем функционального диагностирования логических устройств автоматики [11].

Важные составляющие системы непрерывного мониторинга – специально разработанное программное обеспечение подсистемы передачи диагностической информации и программное обеспечение верхнего уровня. Программная часть системы построена по технологии клиент-сервер и состоит из следующих программных модулей:

- 1) модуль концентратора информации для сбора сообщений с датчиков;
- 2) сервер приема и обработки сообщений от концентраторов информации;
- 3) база данных SQL, представляющая собой защищенное хранилище всей информации о системе, а также о состоянии контролируемых устройств в любой момент времени;
- 4) автоматизированные рабочие места диспетчеров (АРМ-Монитор); АРМ могут быть установлены локально или доступны через облако; АРМ-Монитор предоставляет доступ к данным для дежурного района контактной сети, диспетчера Центра мониторинга и диагностики устройств электрификации и электроснабжения.



Рис. 4. Ретрансляторы сигналов

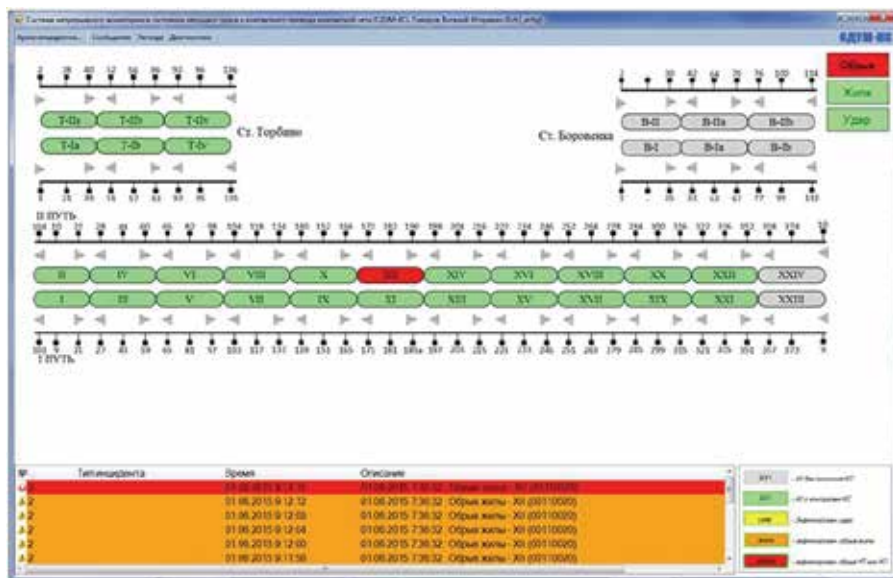


Рис. 5. Главное технологическое окно системы непрерывного мониторинга

Основные функции программного обеспечения верхнего уровня:

- 1) автоматическая система развертывания программного обеспечения;
- 2) автоматическая система обновления программного обеспечения;
- 3) авторизация пользователей;
- 4) отображение событий в системе в реальном режиме времени;
- 5) отображение данных в табличном или графическом виде;
- 6) построение отчетов по заданию пользователя;
- 7) просмотр содержимого архива событий в любой промежуток времени;
- 8) диагностирование состояния компонентов самой системы;
- 9) звуковые и графические уведомления;
- 10) протоколирование действий пользователя;
- 11) доступ к технической документации участков контроля.

На рис. 5 приведен внешний вид технологического окна системы непрерывного мониторинга тросов и проводов контактной подвески. Отметим, что в этой системе датчики вибродиагностики фиксируют следующие дефекты и события:

- 1) обрывы одной или нескольких жил несущего троса;
- 2) полный обрыв несущего троса и контактного провода;
- 3) удары по контактному проводу;
- 4) ненормативная работка компонента;
- 5) возникновение автоколебаний и вибраций в несущем тросе и в контактном проводе;

6) протоколирование выполнения работ по техническому обслуживанию.

Компоненты системы полностью изготовлены на отечественных предприятиях или на локализованных предприятиях на территории РФ. Стоимость оборудования не превышает 5 % от затрат на капитальное строительство контактной сети.

Результаты экспериментов с датчиками вибродиагностики

Перед постановкой системы непрерывного мониторинга на основе вибродиагностики тросов и проводов контактной подвески проведена серия экспериментальных испытаний на учебном полигоне станции «Тосно» Октябрьской железной дороги (ЭЧ-3). Опишем один из экспериментов.

Датчик вибродиагностики был смонтирован на медном тросе типа ПБСМ-95 длиной 500 м, закрепленном на высоте 5 м. Трос был натянут с усилием 1800 даН, что зафиксировано динамометром. Цель эксперимента – выявить с помощью акселерометров обрывы жил несущего троса. Для регистрации виброускорений использован трехкоординатный акселерометр типа Crossbow CXL-GP3, имеющий следующие характеристики:

- 1) диапазон входа (g) ±6;
- 2) чувствительность (mB/g) 500±25;
- 3) ширина полосы (Гц) DC-100;
- 5) диапазон температур от -40 до +85 °C;
- 6) ударная нагрузка (g) 2000.

В эксперименте были поочередно повреждены три отдельные жилы несущего троса, а также зафиксирована

реакция вибродатчика на данные события. Результаты эксперимента представлены на графиках, где оси (X, Y, Z) вибродатчика выделены определенными цветами.

Фаза 1 эксперимента. На трос и установленный датчик искусственных воздействий не оказывается (рис. 6). Длительность фазы t_0 , среднее значение регистрируемых ускорения $5 \cdot 10^{-2}$ м/с². Значения по трем осям коррелируют и когерентны между собой.

Фаза 2 эксперимента. При помощи шлифовальной машинки повреждена одна жила внешнего повива троса (рис. 7). Длительность фазы t_1 , среднее значение регистрируемых ускорения 0,7 м/с². Изменение значений происходит по трем осям датчика. Спектр изменений виброколебаний отражает плотность значений при возросших амплитудах вынужденных колебаний. Колебания спектра носят высокочастотный, равномерно распределенный характер, выраженных пиков по координатам не наблюдается.

Фаза 3 эксперимента. Прекращение внешнего воздействия инструмента, поврежденная жила внешнего повива несущего троса испытывает напряжение (рис. 8).

С помощью инструмента достигается эффект частичного механического повреждения жилы несущего троса,

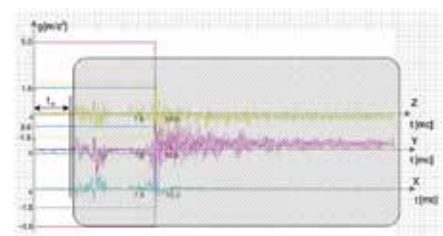


Рис. 6. Начальная фаза эксперимента

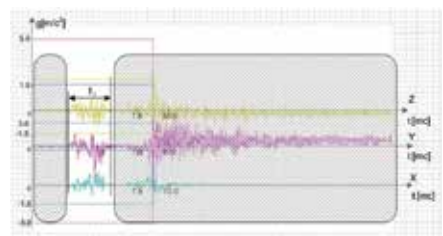


Рис. 7. Воздействие инструмента

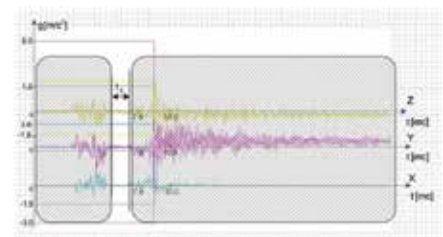


Рис. 8. Воздействие прекращено; жила повреждена

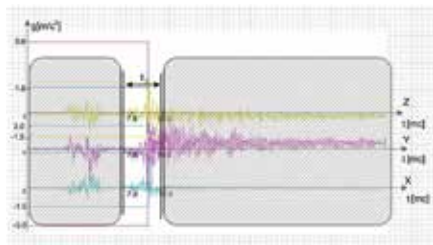


Рис. 9. Жила оборвана

которая затем под воздействием приложенного нормативного усилия должна лопнуть. Нанесенного повреждения недостаточно для получения максимальной энергии от момента разрыва жилы. Длительность фазы t_2 , среднее значение регистрируемых ускорения $5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$. Значения по трем осям коррелируют и когерентны между собой.

Фаза 4 эксперимента. На трос и установленный вибродатчик не оказывается искусственных воздействий. Длительность фазы t_3 , среднее значение регистрируемых ускорения $3,5 \text{ м/с}^2$; значения по трем осям коррелируют и когерентны между собой (рис. 9).

Фаза 5 эксперимента. На трос и установленный датчик искусственных воздействий не оказывается. Длительность фазы t_4 , среднее значение регистрируемых ускорения $0,5 \text{ м/с}^2$. Значения по трем осям не коррелируют, идет процесс успокоения (рис. 10).

Полученные в ходе экспериментов результаты легли в основу математической модели на основе модального анализа, реализованной на программном уровне системы непрерывного мониторинга. Математическая модель автоматически в режиме реального времени фиксирует следующие события:

- 1) прохождение поезда типа «Сапсан»;
- 2) «прокачка» грузов;
- 3) обрыв жилы несущего троса;
- 4) обрыв несущего троса;
- 5) прохождение электропоезда;
- 6) выскальзывание контактного провода из зажимов;
- 7) падение предметов (деревьев) на несущий трос, контактный провод;
- 8) возникновение резонансных колебаний.

Напомним, контактная подвеска – наиболее ненадежный элемент железнодорожной инфраструктуры и не имеет резервирования. Неисправности контактной подвески приводят к значительным перерывам в движении поездов на электрифицированных линиях железных дорог. Мероприятий по техническому обслуживанию объектов контактной

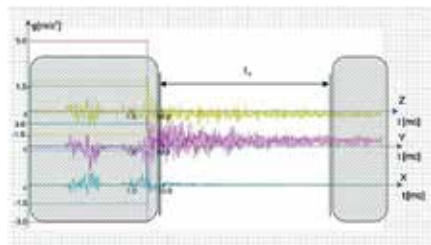


Рис. 10. Поглощение энергии (успокоение)

сети недостаточно, чтобы получить адекватное представление о ее техническом состоянии. Проблему эффективного обслуживания контактной подвески можно решить, создав систему непрерывного мониторинга ее состояния. Первым шагом к созданию высокоинтеллектуального комплекса непрерывного мониторинга стала вибродиагностика на основе акселерометров.

В разрабатываемых аппаратных и программных решениях системы мониторинга контактной подвески учитываются лучшие достижения зарубежных специалистов и опыт отечественных научных школ. Сейчас система находится в эксплуатации, ведется сбор статистических данных для аналитического контроля состояния контактной сети на скоростной линии Санкт-Петербург – Москва, чтобы определить номинальные значения для датчиков системы по определяемым диагностическим событиям.

Эксплуатация систем непрерывного мониторинга особенно актуальна при строительстве и эксплуатации скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий. Сегодня на территории России действуют высокоскоростные линии Хельсинки – Санкт-Петербург и Санкт-Петербург – Москва, строится линия Москва – Казань с последующим продлением до Екатеринбурга. Повсеместное внедрение системы мониторинга контактной подвески позволит повысить надежность и безопасность перевозочного процесса, а также увеличить конкурентоспособность железнодорожного транспорта на рынке перевозочных услуг.

Авторы выражают благодарность за ценные рекомендации канд. техн. наук, профессору Уральского государственного университета путей сообщения Александру Васильевичу Ефимову, а также профессору, д-ру техн. наук, заведующему кафедрой «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I Александру Николаевичу Марикину.

Литература

1. Ефанов Д. В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 1.
2. Ефанов Д. В. Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Транспорт Урала. 2015. № 1. С. 35–40.
3. Park Y., Cho Y. H., Lee K et al. Development of an FPGA-based Online Condition Monitoring System for Railway Catenary Application // 8th World Congress on Railway Res. COEX, Seoul, Korea. 2008. 18–22 May.
4. Park Y., Kwon S. Y., Kim J. M. Reliability Analysis of Arcing Measurement System Between Pantograph and Contact Wire // Transact. Korean Inst. Electr. Engineers. 2012. Vol. 61. № 8. P. 1216–1220.
5. Mizan M., Karwowski K., Karkosiński D. Monitoring odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych na linii kolejowej // Przegląd Elektrotechn.. 2013. R. 89, N 12. P. 154–160.
6. Theune N., Bosselmann T., Kaiser J, et al. Online Catenary Temperature Monitoring at New High-Speed Rail Line Cologne-Rhine/Main // WCRR. 2003. Vol. 18, Is. 5. P. 1038–1043.
7. Долинский К. Ю., Лыков А. А., Соколов В. Б. и др. Система удаленного мониторинга состояния железнодорожной контактной сети // Транспорт РФ. 2010. № 5. С. 44–47.
8. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Седых Д. В. и др. Способ непрерывного мониторинга механического усилия в проводах и тросах контактной подвески // Транспорт Урала. 2016. № 1. С. 9–15.
9. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. L. et al. Sum Code Formation with Minimum Total Number of Undetectable Errors in Data Vectors // Proc. 13th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2015). Batumi, Georgia. 2015. P. 141–148.
10. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. и др. Организация систем функционального контроля комбинационных схем на основе модифицированного кода с суммированием взвешенных переходов (начало) // Электрон. моделирование. 2015. Т. 37, № 6. С. 49–68.
11. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Основы технической диагностики. М.: Маршрут, 2004. 318 с.