

Методы диагностики инженерных объектов на основе нейросетей

И.Н. Коц, И.Е. Лысенко, В.В. Полякова, А.В. Ковалев

Южный федеральный университет

Аннотация: Железнодорожный транспорт играет ключевую роль в транспортировке пассажиров и грузов. Высокая потребность в эффективных средствах дефектоскопии высокоскоростных рельсов, которая является важным компонентом безопасности железных дорог, оправдана постоянно растущим количеством транспортных средств и их скоростью. Выход из строя элементов железнодорожной инфраструктуры влечет за собой огромные убытки. В связи с этим анализ и прогнозирование состояния элементов железнодорожной инфраструктуры является актуальной задачей. В данной статье проведен анализ современных методов диагностики состояния рельсового пути из подвижной тележки или обычного локомотива. Предложена модель метода диагностики рельсового пути, основанный регистрации колебаний вблизи поверхности качения рельсов и обработки этих сигналов с помощью нейросетей.

Ключевые слова: рельсовая дефектоскопия, поверхность колеса, алгоритм, ИИМ, МЭМС, система управления, инерционный датчик, дефект рельса, бесконтактное измерение.

Введение

В настоящее время железные дороги используются по всему миру. Ввиду большой нагрузки на колесные пары и железнодорожное полотно, происходит естественный износ. Для обеспечения безопасности железнодорожного движения необходимо производить диагностику и своевременное обслуживание. В настоящее время большинство железнодорожных организаций осуществляют мониторинг путей, измеряя неровности геометрии с помощью сложных устройств, установленных на специализированных диагностических железнодорожных транспортных средствах. Хотя этот метод обеспечивает точные измерения неровностей пути, это очень дорогостоящий и трудоемкий процесс [1-3]. Особенностью современной ситуации в области дефектоскопии рельсов является то, что поверхность качения рельса анализируется на малых скоростях (до 60 км/ч, что ограничено возможностями дефектоскопа). Иногда диагностику проводят даже вручную (дефекты поверхности определяются визуальным осмотром, а затем измеряются ручным инструментом). Независимо от того, используются

ли трековые автомобили или ручные измерительные приборы, контролируемый участок пути должен быть закрыт на время диагностики; а каждая минута простоя транспортных артерий приводит к серьезным денежным потерям [4]. В связи с этим разработка эффективных средств диагностики и прогнозирования состояния элементов железнодорожной инфраструктуры является актуальной задачей.

Диагностика железнодорожной плети

В мире используются различные системы исследования рельсового пути.

В работе [1] предложены классификаторы на основе машинного обучения для контроля амплитуды продольных и поперечных неровностей рельсового пути от продольных и поперечных ускорений рамы тележки. Набор данных состоит из полевых измерений, а также численного моделирования, выполненного с использованием трехмерного программного обеспечения [1]. Этап обучения проводился с использованием только имитационных данных; затем обученный классификатор тестировался с помощью измерений. Таким образом, классификатор обучался с величинами неровностей пути и ускорений, превышающими уровень, найденный в измерениях. Таким образом, классификатор способен обнаруживать необычное состояние рельсовых неровностей [1].

В этой же работе применяются три различных алгоритма: древо решений, линейный метод опорных векторов и гауссовский метод опорных векторов. Древо решений — это простой алгоритм, который легко реализовать и интерпретировать. С другой стороны, он не является надежным: небольшое изменение обучающих данных может привести к большому изменению структуры классификатора. Точность и показатели точности для древа решений, полученные на этапе тестирования, также ниже, чем у других классификаторов. Линейные и Гауссовы методы опорных

векторов дают сходные результаты с точки зрения прецизионности, точности и других параметров. Однако Гауссовский метод опорных векторов имеет больше степеней свободы при определении граничных условий и может считаться более способным формулировать правильные граничные условия в динамической перспективе [1].

В работе [5] информационно-диагностическая система в сочетании с восьмиканальным датчиком на основе датчиков Холла обеспечивающая синхронную запись и отображение многоканальной дефектоскопической информации при дефектоскопии утечки магнитного потока путей. Так же в данной работе помимо традиционной записи сигналов используют визуализацию исследуемого фрагмента поверхности железнодорожной головки изображением, яркость которого пропорциональна величине рассеяния магнитного поля этого фрагмента. Это позволяет зафиксировать пространственную неоднородность элементов трека, определить размеры обнаруженных неоднородностей и обнаружить их в поперечном сечении рельсового пути по отношению к ее рабочим или нерабочим сторонам, что может быть полезно при определении степени опасности обнаруженных дефектов [5].

В источнике [4] используется инерциальная система диагностики железнодорожных путей. Система работает и постоянно используется для диагностики состояния рельсового пути в составе дефектоскопа АВИКОН-03М ОАО «Радиоавионика».

Система основана на наборе из четырех инерциальных измерительных модулей (ИИМ), расположенных на последовательных колесах дефектоскопа (по два с каждой стороны). Расположение измерительных модулей на тележке показано на рис. 1.

В дополнение к инерциальным измерительным модулям, система включает в себя бесплатформенную инерциальную навигационную систему

(БИНС), спутниковую навигационную систему (СНС), оптические сканеры головки рельса и измеритель расстояния (одометр). Используя данные, полученные от этих датчиков, система измеряет геометрические параметры рельсового пути, а также вычисляет параметры ориентации и навигации тележки.

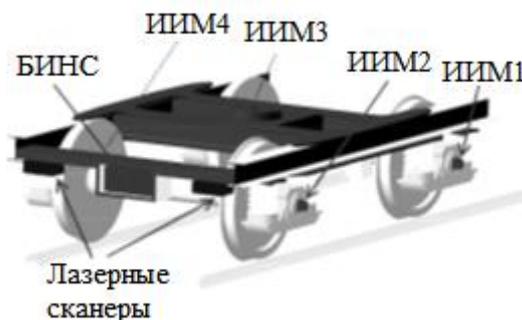


Рис. 1. Расположение измерительных модулей на тележке дефектоскопа [4]

Каждый из инерциальных измерительных модулей включает в себя один трехосный акселерометр ADXL 325 с диапазоном измеренного ускорения ± 5 g; два двухосных акселерометра ADXL 278 с диапазоном измеренного ускорения ± 35 g; три одноосных гироскопа ADXRS 614 с диапазоном измеренных угловых скоростей ± 75 °/с и датчик температуры. Использование акселерометров с различными диапазонами измерений обусловлено необходимостью контроля перемещения колесных пар тележки как при наличии ударных воздействий (при прохождении стыков), так и при движении по относительно гладким участкам железной дороги.

Используемый в настоящее время алгоритм определения профиля рельсовых путей в вертикальной плоскости основан на анализе функции взаимной корреляции сигналов, полученных от вертикальных акселерометров на передних и задних колесных парах тележки. Сигнал вертикального ИИМ, расположенного на буксе ведущей колесной пары тележки, задерживается на период времени, необходимый для прохождения

тележкой расстояния, равного расстоянию между осями; то есть сигналы от ИИМ1 и ИИМ2 настраиваются на координату рельсового пути (определяется одомером). После этого они входят в блок корреляционного анализа. Если рельсовый путь имеет неравномерность в вертикальной плоскости, сигналы акселерометров, расположенных как на ведущих, так и на задних колесах, будут иметь отличительный отклик. То есть повторяемость сигналов двух последовательных акселерометров является критерием определения неравномерности.

Адаптация инерциальной системы диагностики рельсового пути для использования на регулярно передвигающихся вагонах приводит к очевидному препятствию: система контроля пути является специализированной измерительной системой. В частности, колеса предполагаются строго цилиндрическими и с ровной поверхностью. Поэтому при установке инерциальной системы диагностики рельсового пути на обычный локомотив необходимо будет каким-то образом учитывать влияние формы и дефектов колес на показания датчиков (прежде всего, инерциального измерительного модуля и одометра). [4].

Еще одной из перспективных с точки зрения возможности установки на неспециализированную подвижную железнодорожную единицу является система, представленная в работе [6], состоящая из системы диагностики дефектов пути (СДДП) и системы измерения геометрии пути (СИГП).

СДДП содержит четыре инерциальных микромеханических модуля, установленных на буксах. Эти модули позволяют отслеживать движение колес и, таким образом, контролировать поверхность качения рельсов, по которым движутся эти колеса. Таким образом, СДДП позволяет измерять поверхность рельсовых дефектов. В качестве дополнительной системы может быть использована магнитометрическая система дефектоскопии.

СИГП состоит из БИНС и сканера боковых сторон головок рельсов, основанных на двух оптических профилометрах, которые составляют одну единицу, которая устанавливается непосредственно на раму. СИГП позволяет измерять геометрические параметры рельсового пути, в том числе ширину колеи и искривление путей.

Привязка полученных результатов к месту на рельсовом пути осуществляется с использованием интегрированной навигационной системы. Поскольку одомер чрезвычайно чувствителен к условиям движения и имеет кумулятивную ошибку при определении пройденного расстояния, его показания объединяются с информацией из БИНС, приемного оборудования спутниковых навигационных систем и навигационных маркеров. Тогда навигационный алгоритм также может учитывать априорную информацию о структуре исследуемого участка пути.

Бесконтактные методы измерения (лазерное сканирование и инерционные технологии) позволяют использовать высокую скорость работы и не создают препятствий для установки системы на скоростных поездах.

В процессе движения система накапливает большие объемы данных о дефектах железнодорожного пути и других отклонениях от нормы, что приводит к проблеме обработки, передачи, использования и хранения информации. Можно уменьшить объем данных с помощью предварительной обработки, которая состоит из выявления изменений величины дефектов и исчезновения / появления новых дефектов.

Сравнение значения подразумевает наличие образца; Такой выборкой в многофизической системе оперативного мониторинга состояния пути является эталонная модель линейного участка (ЭМЛУ). ЭМЛУ содержит достоверную информацию о дефектах и их координатах на рельсовом пути. Данные из измерительной системы сравниваются с данными ЭМЛУ, и когда

изменение в дефекте обнаруживается на величину, превышающую указанную ошибку, делается вывод о появлении новых полезных данных.

Координаты рельсового пути от одометра, как отмечалось выше, имеют кумулятивную ошибку. Ошибка в линейной координате вызывает трудности идентификации дефекта при сравнении его с образцом. Использование системы навигации и вейвлет-преобразования, с помощью которого можно определять рельсовые узлы и повышать точность линейной координаты, помогает решить эту проблему [6].

В работе [7] для определения внешних дефектов рельсового пути и наличия возможных помех предлагается использовать метод анализа размытия изображения объекта. В качестве инструмента для реализации этого способа необходимо использовать камеру или стереосистему (две камеры), прикрепленные и направленные по ходу движения поезда, чтобы было видно путь впереди. При расфокусировке камеры изображение объекта становится размытым, что несет информацию о местонахождении объекта (расстояние от точки привязки - камеры - до объекта). На серии изображений экспериментально получена зависимость размытия в пикселях от расстояния до объекта в метрах. Чем дальше объект находится от точки фокусировки камеры, тем больше размытие на кадре.

Для расширения возможностей метода анализа размытия изображения за счет увеличения границ его применимости предложен алгоритм реконфигурации фокусного расстояния камеры. Например, использование устройства Nikon DX3100 с минимально допустимым фокусным расстоянием 24 мм на фиксированном расстоянии до точки фокусировки 1,2 м приводит к низким значениям ошибки. При изменении расстояния до точки фокусировки ошибка будет увеличиваться. Чтобы сохранить глубину ошибки в пределах допустимого диапазона при увеличении расстояния от точки фокусировки, можно увеличить только фокусное расстояние камеры. Изменение апертуры

камеры приводит к еще более резким изменениям размытия изображения, что препятствует сбору первичной информации об объекте.

После определения параметров камеры осуществляется сбор информации с изображения, определяются координаты объекта на кадре, поведение объекта (статическое или движущееся), оценивается размытие его границ и ошибка нахождения размытия с использованием уже известных и построенных графиков для каждого фокусного расстояния и для каждого расстояния до точки фокусировки. Все полученные параметры хранятся в отдельном модуле системы мониторинга в базе данных. Первоначально задается минимально допустимая длина фокусного расстояния камеры и минимально возможное расстояние до объекта, расположенного в точке фокусировки, при которой глубина резкости не превышает заданную норму поля. Если размытие объекта находится в пределах границ «плавного» размытия, то есть возможная ошибка определения расстояния находится в допустимых пределах, это прямое определение расстояния до объекта. Если достигается размытие, при котором невозможно точно определить расстояние до объекта, то предлагаемый алгоритм автоматически сместит точку фокусировки [7].

В работе [8] предлагается использовать систему, которая должна включать три подсистемы: систему измерения геометрических параметров пути (СИГП), систему диагностики дефектов пути (СДДП) и систему навигации на рельсовом пути.

Система СИГП состоит из трех измерительных модулей: двух оптических сканеров (работающих по принципу триангуляции), сканирующих каждую рельсу и БИНС, связывающих результаты этого сканирования с базовой системой координат и определение характеристик движения локомотива по рельсовому пути (затем используется при расчете ряда геометрических параметров). Важным фактором здесь является жесткое

механическое соединение всех трех измерительных модулей на единой основе. Это необходимо для обеспечения того, чтобы расстояние между сканерами было постоянным, и чтобы все три модуля были ориентированы одинаково. В состав СДДП входит ИИМ, смонтированный на буксах колесных пар шасси грузовых локомотивов с обеих сторон и одометр, который позволяет определять участки сигналов датчиков, соответствующие прохождению одного и того же элемента колеи, с введением сигналов перед хост-модулями соответствующей задержки. Исходя из максимального значения скорости во время диагностики, выбирается набор микромеханических датчиков (акселерометры и гироскопы) для измерения глубины рельсовых неровностей с заданной точностью. Минимальный набор ИИМ, обеспечивающий возможность отличить дефект на рельсе от дефекта в колесе или вибрации конструкции, по два на каждой стороне локомотива (решение о наличии дефекта в рельсе принимается со значительной корреляцией сигналов двух ИИМ, установленных с одной стороны, при последовательном прохождении неровностей). Система навигации рельсового пути предполагает использование информации от БИНС, приемного оборудования системы спутниковой навигации и одометра. Следует отметить, что использование в алгоритмах навигации данных из спутниковой навигации вместе с данными из БИНС требует их преобразования в единую систему координат (БИНС устанавливается на шасси, а антенна - на корпус локомотива). Для этой цели, например, может быть использована оптическая система для определения относительного положения плоскостей, состоящая из трех излучателей и трех приемников, расположенных на верхней части тележки и на нижней части корпуса (друг под другом) соответственно [8].

Метод диагностики рельсового пути

Для диагностики рельсового пути предлагается использовать комплекс работающий на шумодинамическом методе и основанный на модели измерительной системы представленной в работе [4]. В процессе прохождения колесной пары по рельсовому пути в виду внутренней динамической локальной перестройки структуры происходит акустическая эмиссия [9] или просто шум. Потенциальные дефекты, такие как возникающие трещины, аллотропические превращения при нагреве, движение скоплений дислокаций наиболее характерные источники шума. Обработку таких шумов предлагается проводить с помощью нейросетей. Измерительный блок будет находиться на борту локомотива, над каждой из плетей, над первой и последней колесными парами локомотива. Таким образом будет осуществляться акустический контроль рельсового пути, а дублирующие измерительные блоки на последней оси будут обеспечивать достоверность полученных данных за счет проверки дублирующего сигнала обрабатывающим блоком и общую надежность всего комплекса.

В измерительном блоке предлагается использовать:

- микромеханический гироскоп-акселерометр для регистрации поперечных и продольных смещений рельсового пути;
- микрофона для регистрации звука в слышимом диапазоне;
- пьезокерамического датчика для регистрации колебаний в ультразвуковом диапазоне;
- устройство беспроводной межблочной передачи информации для обмена данными между измерительным блоком и блоком обработки.

Блок обработки предлагается делать на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), в которую будет загружена обученная нейросеть. Также в него будут входить устройства беспроводной межблочной передачи информации для обмена данными между блоком

обработки и измерительным блоком, GSM модуль для связи с центральным сервером и приемник GPS/ГЛОНАСС для регистрации местоположения предполагаемого дефекта. Антенна для устойчивого приема сигнала GPS/ГЛОНАСС будет устанавливаться на крыше локомотива. Схематическое изображение расположения элементов системы на локомотиве показано на рисунке 2.

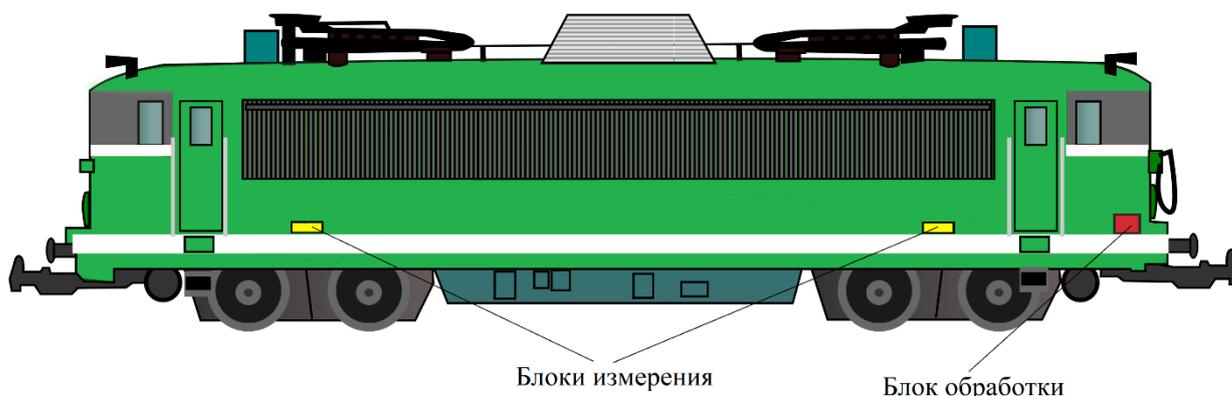


Рис. 2. Схема размещения модулей на локомотиве

На центральном сервере будет производиться обработка и хранение полученной информации. В случае обнаружения дефектов будут уведомляться соответствующие службы. Блок-схема устройства измерительного комплекса представлена на рис. 3.

Заключение

Проведен обзор современного состояния диагностики железнодорожных путей автоматизированными методами. Предложенный метод основан на модели измерительной системы, представленной в работе [4] и отличается от описанных выше тем, что в нем для диагностики рельсового пути предлагается использовать помимо вибраций локомотива акустический шум, а для обработки полученной с датчиков информации

будут использоваться нейронные сети. Предполагается, что с помощью данного метода будет возможно интерпретировать конкретные дефекты [10].



Рис. 3. Блок-схема измерительного комплекса

Данная работа выполнена при финансовой поддержке проекта FENW-2020-0022 по выполнению научно-исследовательских работ, выполняемых за счет средств федерального бюджета, в части научной деятельности по теме «Разработка и исследование методов и средств мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния инженерных объектов на основе искусственного интеллекта».

Литература

1. Di Gialleonardo E., Facchinetti A., Bruni S., Kulkarni R., Qazizadeh A., Berg M., Rossa A. Monitoring of lateral and cross level track geometry irregularities through onboard vehicle dynamics measurements using machine learning classification algorithms // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit. 2020. pp. 1-14.

2. Суханов А.В., Артемьев И.С., Долгий А.И., Хатламаджиян А.Е. Метод оптической идентификации железнодорожных подвижных единиц на основе интегральных устойчивых признаков // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2217
 3. Юренко И.К., Шепилова Е.Г., Гречук И.А. Совершенствование бортовых систем управления локомотивов на базе технических средств тренажеро-моделирующих комплексов // Инженерный вестник Дона. 2014. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2452
 4. Boronakhin A., Larionov D., Podgornaya L., Tkachenko A., Shalymov R. Inertial Method of Railway Track Diagnostics Incorporating the Condition of Rolling Surfaces of the Railcar's Wheels // 2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). 2019. pp. 49-53.
 5. Nichoha V., Storozh V., Matiieshyn Y. Results of the development and research of information-diagnostic system for the magnetic flux leakage defectoscopy of rails // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. pp. 852-857.
 6. Larionov D., Romantsova N., Shalymov R. Multiphysical System of Operational Monitoring of the Condition of the Railway Track // 2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). 2019. pp. 59-63.
 7. Loktev D.A., Loktev A.A., Diagnostics of External Defects of Railway Infrastructure by Analysis of its Images // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). 2018. pp. 1-7.
 8. Minina A.A., Zhdanova E.N., Shalymov R.V. Subsystem On-Board Information-Measuring System // 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). СПб: 2018. pp. 248-252.
-

9. Сафарбаков А.М., Лукьянов А.В., Пахомов С.В. Основы технической диагностики: учебное пособие. – Иркутск, 2006. – 217 с.

10. Буряк С.Ю. Диагностирование состояния поверхности катания колеса подвижного состава железных дорог // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2013. №1 (43). URL: cyberleninka.ru/article/n/diagnostirovanie-sostoyaniya-poverhnosti-kataniya-kolesa-podvizhnogo-sostava-zheleznyh-dorog.

References

1. Di Gialleonardo E., Facchinetti A., Bruni S., Kulkarni R., Qazizadeh A., Berg M., Rossa A. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit. 2020. pp. 1-14.

2. Suhanov A.V., Artem'ev I.S., Dolgij A.I., Hatlamadzhijan A.E. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2217

3. Yurenko I.K., Shepilova E.G., Grechuk I.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2452

4. Boronakhin A., Larionov D., Podgornaya L., Tkachenko A., Shalymov R. 2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). 2019. pp. 49-53.

5. Nichoha V., Storozh V., Matiieshyn Y. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. pp. 852-857.

6. Larionov D., Romantsova N., Shalymov R. 2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). 2019. pp. 59-63.

7. Loktev D.A., Loktev A.A., 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). 2018. pp. 1-7.



8. Minina A.A., Zhdanova E.N., Shalymov R.V. 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). SPB: 2018. pp. 248-252.

9. Safarbakov A.M., Luk'yanov A.V., Pakhomov S.V. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki: uchebnoe posobie [Fundamentals of technical diagnostics: tutorial] Irkutsk 2006. 217 p.

10. Buryak S.Yu. Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta. 2013. №1 (43). pp 22-29. URL: cyberleninka.ru/article/n/diagnostirovanie-sostoyaniya-poverhnosti-kataniya-kolesa-podvizhnogo-sostava-zheleznyh-dorog.