

Парахненко Инна Леонидовна

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Уральский государственный

университет путей сообщения»

г. Екатеринбург, Свердловская область

ПРЕДИКТИВНЫЙ АНАЛИЗ БОКОВОГО ИЗНОСА В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

***Аннотация:** предиктивный анализ технического состояния железнодорожного пути представляет собой прогнозирование изменения его состояния, основанное на уже изученных, проанализированных данных, собранных за определенный временной промежуток. Основной задачей предиктивного анализа является оптимизация планирования работ по текущему содержанию пути и восстановительным работам. С помощью предиктивного анализа значительно снижается риск как несвоевременного выполнения этих работ, так и сопутствующего возникновения аварийных ситуаций.*

***Ключевые слова:** предиктивный анализ, кривые участки, железнодорожный путь, изнашивание, боковой износ рельсов.*

При прогнозировании состояния пути выделяют два способа: прогнозирование срока наступления предельного состояния, требующего ремонт и прогнозирование достижения нормированных величин [1].

Каждый из способов применяется в определенных целях, например, прогнозирование достижения нормированных величин будет полезно при исследовании зависимостей и закономерностей, при которых путь изнашивается в различных условиях, а срок наступления предельного состояния покажет, какой тоннаж или какой промежуток времени путь будет действовать без принятия мер по его восстановлению.

Для прогнозирования состояния пути проводится глубокая аналитика, в том числе включающая в себя сведения о доле негодных элементов верхнего строения пути, выраженной в процентном соотношении [1]. Однако, интенсивность

накопления неисправностей верхнего строения пути неодинакова на всех его участках, поэтому дополнительно требуются знания о закономерностях их изменения, особенные для каждого участка.

Также необходимо учитывать, что путь – восстанавливаемая система, вследствие чего ее параметры постоянно подвергаются изменениям, вследствие чего ее прогнозирование значительно усложняется. Поэтому к ней не применимы стандартные линейные методы расчета, подразумевающие непрерывное накопление деформаций конструкции при прохождении по ней определенного количества тоннажа [2]. Так, например, будет затруднено описание процесса деградации пути линейной или степенной функцией, которые не учитывают периоды стабилизации пути после капитального ремонта.

На ранних этапах прогнозирования были предложены модели [1], которые охарактеризовывали бы изменение состояния пути. Было предложено несколько вариантов, разработанных в ходе многолетнего анализа и исследований. Среди них – линейная, степенная, логарифмическая зависимости, функция интенсивности отказов и полином.

Линейная зависимость – простейшая модель, которая используется на малых горизонтах, ее предел – от 2 до 3 лет. Основная ее проблема – несоответствие теории надежности и самой механике процесса износа пути.

Степенная зависимость – модель, используемая наиболее часто, позволяет осуществить более длительный горизонт планирования, однако также имеет свои недостатки, например, не учитываемое свойство восстанавливаемости конструкции пути, из-за чего нарушается описание процесса изменения его состояния.

Логарифмическая зависимость учитывает замедления ухудшения состояния пути в отдельных случаях, что включает в модель процесс восстановления пути, однако не учитывает накопление неисправностей в период ухудшения состояния.

Функция интенсивности отказов применима исключительно для невосстанавливаемых объектов, поэтому не будет достоверной при большом объеме путевых работ.

Полином хоть и учитывал различные факторы с помощью переменных, оказался непригодным для использования, так как зачастую приводил к некорректным результатам, например, отрицательному числу неисправностей пути.

В действительности, процесс изменения технического состояния пути сложнее предложенных моделей. В ходе исследований Петербургского государственного университета путей сообщения [3] была построена наиболее приближенная к реальной зависимость изменения технического состояния пути от наработанного тоннажа. Работа пути в этом случае описана в 4 этапа.

1 Этап – приработка и стабилизация элементов пути.

2 Этап – нормальная эксплуатация, не имеющая интенсивного накопления неисправностей.

3 Этап – ухудшение технического состояния пути с увеличением интенсивности накопления неисправностей.

4 Этап – стабилизация технического состояния пути при условии своевременного обслуживания и достаточного объема работ.

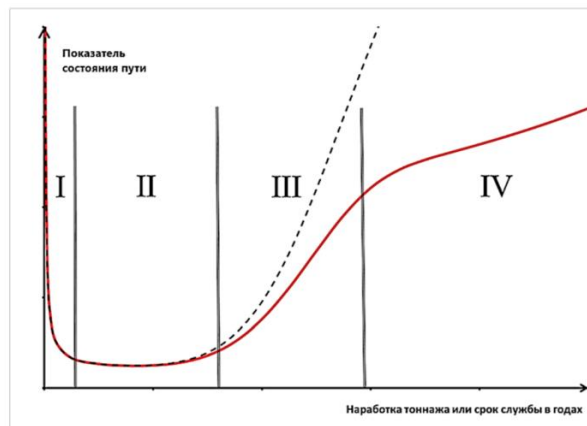


Рис. 1. Действительная зависимость
технического состояния пути от наработанного тоннажа [3]

В целях изучения, глубокого анализа, а также прогнозирования состояния пути разрабатываются цифровые двойники железнодорожного пути. Цифровой двойник – цифровая модель железнодорожного пути, основная часть комплексного инструмента, позволяющего оптимизировать процессы планирования

технического обслуживания и ремонта пути в зависимости от его реального состояния с использованием цифрового имитационного моделирования [4].

Для построения цифрового двойника на основе реальных данных применяется диагностический комплекс «Север», который позволяет: контролировать геометрические параметры рельсовой колеи, оценивать по ним техническое состояние пути; обрабатывать сопутствующие параметры, такие как скорость следования, расстояние; обрабатывать параметры привязки; документировать критические отступления, выдавая предупреждение в виде звуковых и световых сигналов; проводить ультразвуковую и магнитную дефектоскопию, лазерное трехмерное сканирование и георадиолокационную диагностику.

Основываясь на полученных от диагностических комплексов данных, проводится построение 3D-моделей элементов железнодорожной инфраструктуры, например, стрелочного перевода. При этом, на этапе построения также указываются отклонения, дефекты и особенности элемента. В результате получается модель элемента, содержащая и наглядно показывающая все отклонения от норм содержания, а также позволяющая проведение имитационного моделирования – процесса симуляции различных условий, например прохождения определенного тоннажа по элементу пути.

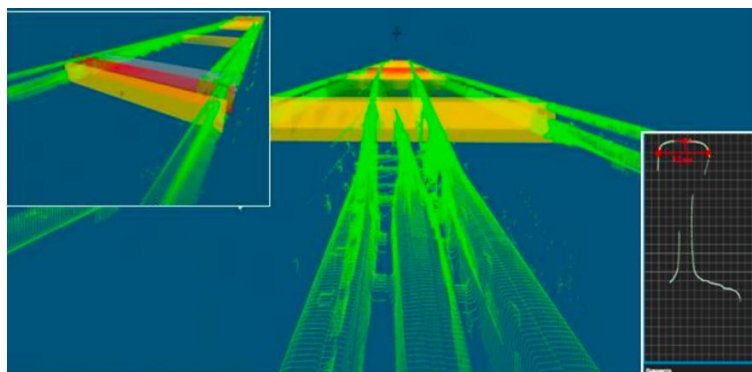


Рис. 2. Цифровой двойник стрелочного перевода с указанием отклонений

На данный момент уже приняты нормативные документы [5], позволяющие стандартизировать имитационное моделирование цифровых двойников. Для создания цифровых двойников приняты четыре основных блока: статичные и

динамичные объекты, процессы, параметры внешней среды. Благодаря ним возможно моделирование различных сценариев и прогнозирование состояния пути.

Для повышения эффективности имитационного моделирования по данным диагностических комплексов проводится также и математическое моделирование. Состояние пути записывается оборудованием как единый пространственный процесс, при этом оценивающийся в виде комплексного баллового показателя. Оценка проводится по превышениям амплитуд неровностей рельсовой колеи.

В настоящее время основным инструментом, позволяющим решать задачи по предиктивному анализу, является система ЕК АСУИ СДМИ (Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой, система комплексной диагностики и мониторинга железнодорожной инфраструктуры). Она представляет собой цифровую платформу, содержащую и обрабатывающую полученные в ходе мобильной диагностики данные о состоянии железнодорожного пути.

Основываясь на существующих данных, система проводит оценку текущего состояния железнодорожного пути, в зависимости от чего обеспечивает своевременное назначение путевых работ и автоматизацию основных элементов управления техническим состоянием пути.

ЕК АСУИ использует многослойную архитектуру нейронных сетей, тщательно настроенную для обработки накопленных объемов данных о истории изменения технического состояния пути. Точность прогнозирования ЕК АСУИ СДМИ составляет 80% при горизонте планирования в 1 год и 92% при горизонте от 1 до 6 месяцев [6].

В результате работы системы определяются оптимальные сроки проведения работ по ремонту пути и профилактике его технического состояния, составляется план работ, учитывающий очередность и приоритеты.

В ЕК АСУИ СДМИ внедрен модуль прогнозирования бокового износа рельсов, основывающийся на статистическом анализе данных об износе, накопленных за 4 года [6]. Метод прогнозирования требует достаточную глубину накопленных данных по конкретному участку, за счет чего нивелируется погрешность

самых измерений. Однако, при таком подходе прогнозирование бокового износа на участках, которые были отремонтированы, невозможно.

Сейчас ведется разработка дополнительного программного модуля, позволяющего осуществлять прогнозирование бокового износа на свежотремонтированных участках, при этом необходимо обеспечить достаточную точность прогноза, составляющую 5 мм. Благодаря такой точности будет обеспечена качественная оценка объемов работ по всем кривым участкам пути.

Список литературы

1. Бельтюков В.П. Применение предиктивного анализа при планировании путевых работ / В.П. Бельтюков // Путь XXI века: сборник трудов V Национальной научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 14–15 сентября 2023 года. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. – С. 65–72. – EDN VAJOQC

2. Баронайте Р.А. Планирование и организация работ по устранению местных расстройств геометрии рельсовой колеи на основе прогноза изменения состояния пути как восстанавливаемой системы со случайными параметрами / Р.А. Баронайте // Путь XXI века: сборник трудов V Национальной научно-практической конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 14–15 сентября 2023 г.). – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. – С. 55–64. – EDN PQLQSC

3. Симонюк И.А. Модель работы железнодорожного пути для прогнозирования технического состояния на этапе перспективного планирования / И.А. Симонюк // Путь XXI века: сборник тезисов Международной научно-методической конференции, Санкт-Петербург, 14–15 февраля 2013 года / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Железнодорожный путь». – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2013. – С. 41. – EDN TTRTUP

4. Асалханова Т.Н. Построение цифровых двойников железнодорожного пути с помощью мобильных средств диагностики / Т.Н. Асалханова, А.М. Давтян

// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – №4(80). – С. 54–64. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).54-64. – EDN COZHMA

5. Об утверждении временной концепции технологии цифрового двойника инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД»: Распоряжение ОАО «РЖД» №1281/р от 09.06.2021. – Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ.

6. Лохач А.В. Интеллектуальная система управления состоянием железнодорожной инфраструктуры / А.В. Лохач // Интеллектуальные транспортные системы: материалы IV Международной научно-практической конференции (Москва, 22 мая 2025 г.). – М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2025. – С. 269–273. – DOI 10.30932/9785002587582-2025-269-273. – EDN KIMIIY