

УДК 656.212.5

ВЫПРАВКА СОРТИРОВОЧНЫХ ПУТЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Хатламаджиян А.Е., к.т.н., доцент, заместитель генерального директора, АО «НИИАС», Москва, Россия, E-mail: a.hatlamadzhiyan@vniias.ru

Ольгейзер И.А., к.т.н., доцент, первый заместитель директора Ростовского филиала, АО «НИИАС», Москва, Россия, E-mail: i.olgezer@vniias.ru

Суханов А.В., к.т.н., доцент, заместитель начальника отделения ИИТЦС, АО «НИИАС», Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: a.suhanov@vniias.ru

Боровлев П.В., ведущий инженер-программист отделения ИИТЦС, АО «НИИАС», Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: p.borovlev@vniias.ru

Аннотация

В работе предложена концепция использования данных Комплекса компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей (КЗСП) при выправке и диагностике продольного профиля пути. Показаны принципы расчета продольного профиля сортировочных путей на основе данных, полученных в результате работы КЗСП. Представлены результаты на реальном объекте внедрения (ст. Кинель Куйбышевской железной дороги), а также анализ профиля с учетом текущей выправки. В заключении представлено описание эффективности КЗСП при оптимизации трудозатрат при автоматизации сортировочных процессах и текущем ремонте путей сортировочного парка.

Ключевые слова: Контроль сортировочных путей, измерение продольного профиля, комплекс компьютерного зрения, автоматизация сортировочных процессов, цифровая железнодорожная станция

REPAIR OF MARSHALLING TRACKS BASED ON COMPUTER VISION DATA ANALYSIS

Khatlamadzhiyan A.E., Ph.D., Associate Professor, Deputy General Director, JSC "NIIAS", Moscow, Russia, E-mail: a.hatlamadzhiyan@vniias.ru

Olgeizer I.A., Ph.D., Associate Professor, First Deputy Director of the Rostov Branch, JSC "NIIAS", Moscow, Russia, E-mail: i.olgezer@vniias.ru

Sukhanov A.V., Ph.D., Associate Professor, Deputy Head of the Department of IITCS, JSC "NIIAS", Rostov-on-Don, Russia, E-mail: a.suhanov@vniias.ru

Borovlev P.V., Leading software engineer of the IITCS department, JSC "NIIAS", Rostov-on-Don, Russia, E-mail: p.borovlev@vniias.ru

Abstract

The paper proposes the concept of using Computer Vision data to monitor the occupancy of sorting tracks (KZSP) when straightening and diagnosing the longitudinal profile of the track. The principles of calculating the longitudinal profile of sorting tracks based on the data obtained as a result of the work of the KZSP are shown. The results are presented at a real implementation facility (Kinel station of the Kuibyshev Railway), as well as an analysis of the profile, taking into account the current alignment. In conclusion, a description of the effectiveness of the KZSP in optimizing labor costs in the automation of sorting processes and the ongoing repair of the sorting fleet tracks is presented.

Keywords: Railway Station Control, longitudinal profile estimation, hump yard automation, digital freight sorting station

Введение

С 2018 года⁶ на инфраструктуре холдинга ОАО «РЖД» осуществляется переход от автоматизированного к автоматическому управлению и контролю технологическими процессами на сортировочной станции с использованием технологий искусственного интеллекта [1]. Этот переход принято называть цифровизацией, а оснащаемые объекты – цифровыми железнодорожными станциями (ЦЖС). Одним из наиболее сложных процессов при переходе к ЦЖС является процесс расформирования-формирования поездов в сортировочном парке. С целью цифровизации контроля сортировочного парка специалистами АО «НИИАС» разработан Комплекс компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей КЗСП [2]. В 2023 году комплекс КЗСП введен в эксплуатацию на станции Кинель. Основным отличием комплекса КЗСП от существующей ранее системы импульсного зондирования (КЗП-ИЗД) является то, что он позволяет контролировать разрывы между группами вагонов (отцепами), а также анализировать динамику движения отцепов. Использование результатов анализа динамики позволило начать разработку еще одной функции, не заявленной в первоначальном техническом задании на КЗСП – анализ продольного профиля [3]. В настоящей работе представлен алгоритм расчета продольного профиля сортировочных путей на основе КЗСП, скорректированный в процессе подготовки к приемочным испытаниям, показаны результаты внедрения функции расчета продольного профиля в постоянную эксплуатацию в 2024 году, а также проиллюстрированы полученные данные и их изменение после выправки продольного профиля.

1. Состояние проблемы

На крупных сортировочных узлах функционирование сортировочного парка осуществляется круглые сутки в связи с необходимостью обработки большого количества вагонов. С учетом необходимости закрытия и освобождения путей сортировочного парка обслуживание сортировочных путей является трудоемкой и времязатратной задачей. В настоящее время обслуживание путей является плановым, т.е. не учитывает актуальность выполнения мероприятий по выправке пути. На практике внедрения систем автоматизации управления сортировочным процессом известно множество небезопасных случаев превышения скорости соударения с повышенной скоростью [4], либо неэффективных случаев остановки отцепов с появлением окон [5]. Большинство таких случаев напрямую связаны с неэффективным планом выправки сортировочного парка. В качестве решения напрашивается работа «от объекта», т.е. исходя из анализа движения отцепов в сортировочном парке. В настоящее время для исходных данных при анализе движения могут быть использованы данные КЗП-ИЗД или КЗСП (рис. 1). Однако КЗСП-ИЗД позволяет «видеть» движение хвоста только последнего зашедшего на путь вагона. Функционал КЗСП включает контроль разрывов между отцепами на всем протяжении сортировочного парка (рис. 2). Далее приведено описание расчета продольного профиля средствами КЗСП с выдачей рекомендаций по его выправке.

⁶ Концепция «Цифровая железнодорожная станция»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 07.11.2018 № 1049 (в ред. от 05.06.2020 № 1217/р).



Рисунок 1. Фото камер, используемых в КЗСП

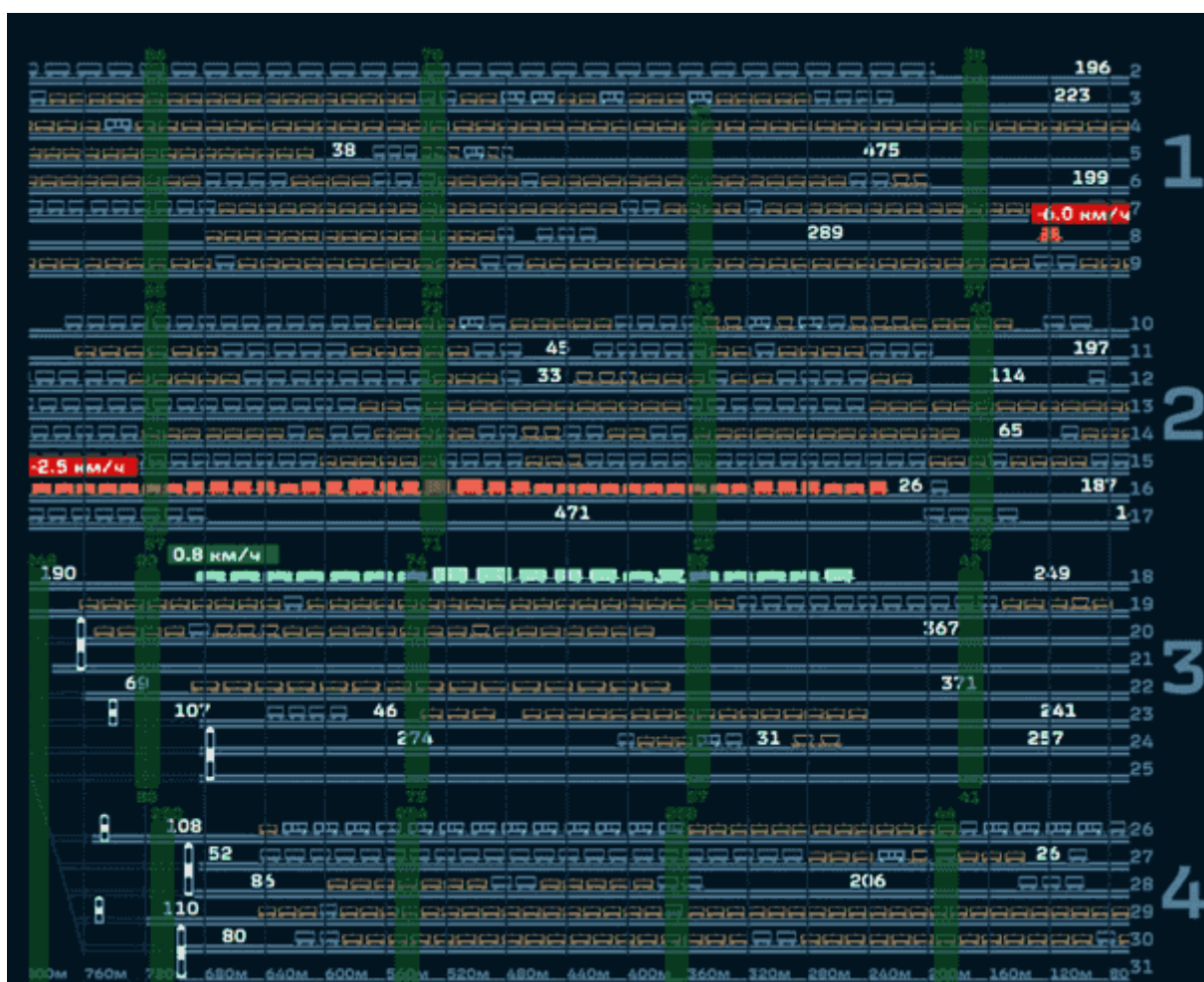


Рисунок 2. Интерфейс КЗСП

2. Реализация диагностики профиля на основе данных о динамике движения отцепов

Процесс диагностики продольного профиля сортировочного пути осуществляется путем «подсветки» уклонов, являющихся небезопасными (больше 0,7 ‰) или неэффективными (отрицательные).

Расчет профиля осуществляется путем корректировки (адаптации) значений известных отметок продольного профиля после проезда каждого отцепа по измеряемому пути. В качестве известных значений используются идеальные отметки профиля, заданные при проектировании (0,6 ‰), либо доступная измеренная инструментальная съемка пути.

В качестве адаптирующих значений взяты координаты отцепов, полученных непосредственно на выходе модели глубокого обучения, используемой в алгоритме обработки данных КЗСП.

Принцип адаптации на основе данных о скорости движения отцепов в сортировочном парке, полученных из выходных данных КЗСП о местоположении подвижных единиц, представлен далее.

2.1. Адаптация инструментального профиля по рассчитанным скоростям на участке

При корректировке профиля каждый путь разбивается на участки, которые исходя из точности КЗСП и влияния на ходовые свойства вагонов принято считать равными 50 м. Для каждого участка рассчитываются аналитическая скорость отцепа (v_n) и скорость отцепа согласно данным КЗСП (v_{pn}) при выходе из участка.

Условие корректировки высоты профиля следующие:

$$|v_{pn} - v_n| \geq \delta \cdot v_{pn}, \quad (1)$$

где $\delta = 0.05$ (5%); $n \in [1, N]$ – номер участка, N – количество участков; v_{pn} – скорость отцепа по данным КЗСП при выходе из участка, м/с; v_n – аналитическая скорость при выходе из участка, м/с.

В зависимости от разницы скоростей происходит корректировка высот профиля (H_n) на ΔH на каждом участке пути⁷.

$$H_n = H_n + \Delta H, \quad (2)$$

где $\Delta H = -\eta \frac{\partial \Delta v}{\partial v}$; H_n – высота профиля, м.

2.2. Расчет аналитической скорости

За основу расчета аналитической скорости движения отцепа в зависимости от уклона используется формула [6]:

$$v_n = \sqrt{v_{n-1}^2 + 2 \cdot g \cdot l \cdot (u_n - W) \cdot 10^{-3}}, \quad (3)$$

⁷ На малых выборках (<100 отцепов) ΔH считается равным $\pm 0,01$ с целью исключения колебаний

где v_n – скорость отцепа при выходе с участка n ($n \in N, N$ – общее количество участков на пути), м/с; v_{n-1} – скорость движения отцепа при входе на участок n , м/с; g' – ускорение свободного падения с учетом инерции вращающихся масс (принято равным 9,66), м/с²; l – длина оцениваемого участка пути n , м; u_n – уклон участка n , по которому движется данный отцеп, ‰; W – суммарное удельное сопротивление движению отцепа, Н/кН.

Расчет аналитической скорости движения отцепа для корректировки высоты профиля опирается на значения условных высот для каждого участка, полученные по формуле [7]:

$$H_n = H_{n-1} - \frac{u_n \cdot l}{1000}, \quad (4)$$

где H_n – условная высота при выходе с участка n , м; H_{n-1} – условная высота при входе на участок n , м; u_n – уклон участка n , по которому движется расчетный отцеп, ‰; l – длина оцениваемого участка пути n , м.

В качестве H_n используются данные известные отметки профиля. Начальная высота H_1 принимается равной 1 (стартовая точка).

Зная значения условных высот из формулы (4), выразим значение уклона на участке n [8]:

$$u_n = (H_{n-1} - H_n) \cdot \frac{1000}{l}. \quad (5)$$

Далее, преобразуем формулу (3), подставив формулу (5) вместо u_n :

$$v_n = \sqrt{v_{n-1}^2 + 2 \cdot g' \cdot ((H_{n-1} - H_n) \cdot 1000 - W \cdot l) \cdot 10^{-3}}. \quad (6)$$

Таким образом, будет получена конечная скорость на участке аналитическим способом, которая применяется в условии (1).

2.3. Расчет скорости согласно данным КЗСП

Расчет скорости КЗСП производится по координатам одновагонных тяжелых отцепов⁸ на каждом участке, полученным на выходе модели глубокого обучения (например, YOLOv5 [9]), для $n > 1$. При $n = 1$ (первый участок) скорость берется равной скорости выхода из третьей тормозной позиции (ЗТП) по данным радиолокационного измерителя скорости (РИС-ВЗМ).

При расчете не учитываются следующие случаи:

- Длинные (> 50 метров) отцепы. На такие отцепы оказывают влияние соседние участки.
- Отцепы, остановившиеся до 100 метров, - «Больные» вагоны [10].
- Движение в обратную сторону. В обратную сторону движутся либо локомотивы, либо остановившиеся ранее отцепы.
- С началом движения после ЗТП – маневровые работы.

⁸ Согласно практике реализации КСАУ СП, при массе более 80 тонн внешние воздействия кроме силы трения практически отсутствуют

Из отобранных данных для каждого отцепа формируются два массива: координаты хвоста отцепа (S) и время (T), за которое хвост отцепа достиг соответствующей координаты из массива S .

Так как уклон на участке считается неизменным, то расчет делается с условием равномерности движения по участку. Однако выходные данные нейронной сети могут давать погрешность и выбросы, поэтому для определения скорости движения на участки используются все точки, полученные на каждом измеряемом участке. В результате формируется аппроксимирующая прямая для системы уравнений:

$$\begin{cases} k_1 \cdot t_1 + m_1 = s_1 \\ \dots \\ k_j \cdot t_j + m_j = s_j \end{cases} \quad (7)$$

где t_j – элемент массива T (j – количество точек, полученных по данным распознавания КЗСП на рассматриваемом участке); s_j – элемент массива S ; k – угловой коэффициент; m – точка пересечения с осью абсцисс.

Запишем систему уравнений в матричном виде:

$$T^* X = S, \quad (8)$$

где T^* – вектор данных о времени, расширенный на единичный вектор (матрица вида $j \times 2$); X – результирующий вектор (матрица размером 2×1); S – строка координат хвоста отцепа (матрица $1 \times j$).

Для решения системы линейных уравнений в матричном виде (8) воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК)⁹. Умножаем обе части уравнения на транспонированную матрицу системы T^{*T} :

$$T^{*T} T^* X = T^{*T} S. \quad (9)$$

Выразим X , умножая обе части уравнения на обратную матрицу $(T^{*T} T^*)^{-1}$:

$$X = (T^{*T} T^*)^{-1} T^{*T} S. \quad (10)$$

Полученный вектор $X = [k, m]$ используем для нахождения аппроксимированной средней скорости для S_n .

Далее, из полученного массива S^* выбираем s_1 и s_n , вычисляем аппроксимированная расстояние на участке по формуле:

$$\Delta v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{l}{\frac{s_n - m}{k} - \frac{s_{n-1} - m}{k}} = \frac{kl}{s_n - s_{n-1}}. \quad (11)$$

Из средней определяется конечная скорость на участке по модели КЗСП, используемая в условии (1):

$$v_{pn} = 2 * \Delta v - v_{нач}. \quad (12)$$

⁹ Решение систем линейных уравнений методом наименьших квадратов. Электронный ресурс URL: <https://piter-melnikov.narod.ru/part2/1.10.htm> (дата обращения 10.01.2024).

Проверка измерений, полученных с помощью КЗСП осуществляется путем сравнения с данными от метрологически поверенных инструментов. В качестве объекта сравнения используется локомотив, выходящий в зону действия КЗСП через поверенный радиолокационный измеритель скорости РИС-ВЗМ [2] с постоянной скоростью. Полученная разница между точками на выходе модели глубокого обучения и прямой скорости локомотива будет являться корректирующей при проезде последующих отцепов (рис. 4).

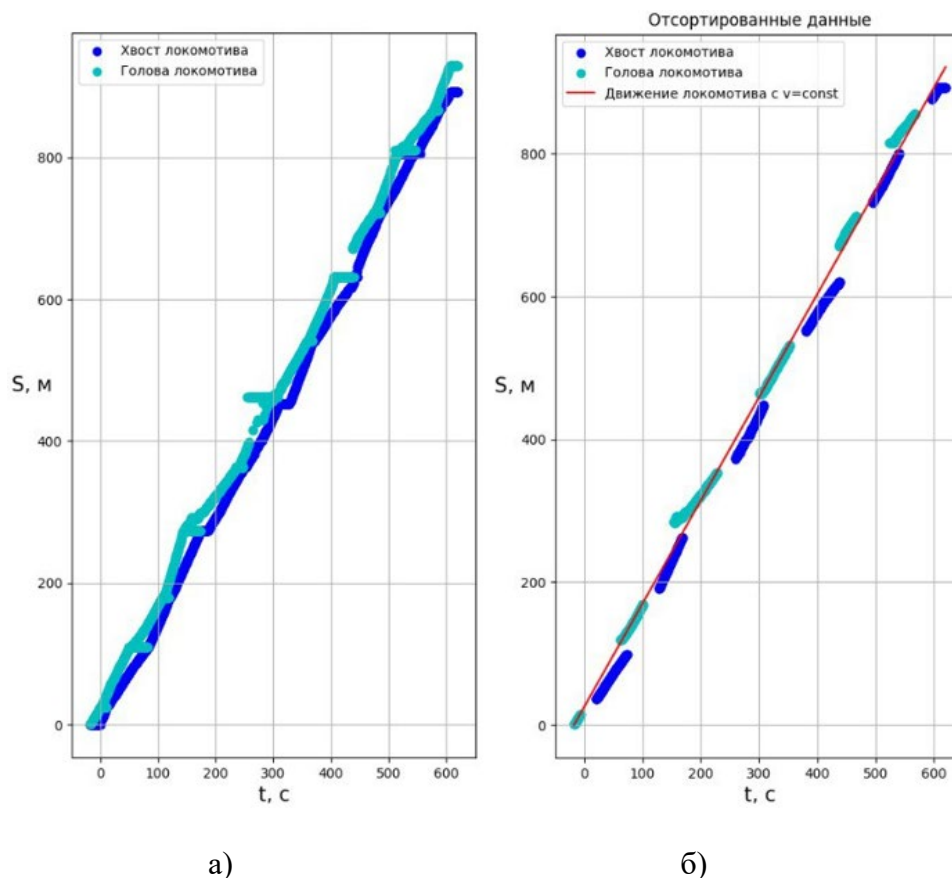


Рисунок 4. Иллюстрация корректировки данных модели глубокого обучения на основе РИС-ВЗМ и локомотива (а – «сырые» данные, б – данные, отфильтрованные от выбросов и реальное движение локомотива)

3. Результаты использования КЗСП при текущей выправке сортировочных путей

На рис. 5 и 6 представлены кривые продольного профиля до и после выправки. До выправки наблюдалось превышение скорости соударения на участке 200-300 метров. Графики были переданы в службу пути для анализа и последующей выправки. После выправки соударения стали с допустимой скоростью. На графиках красно-оранжевой линией обозначен профиль, рассчитанный по данным КЗСП (красные участки – небезопасные, оранжевые – неэффективные), синей – доступный измеренный профиль 2022 года, зеленые линии обозначают коридор идеального профиля.

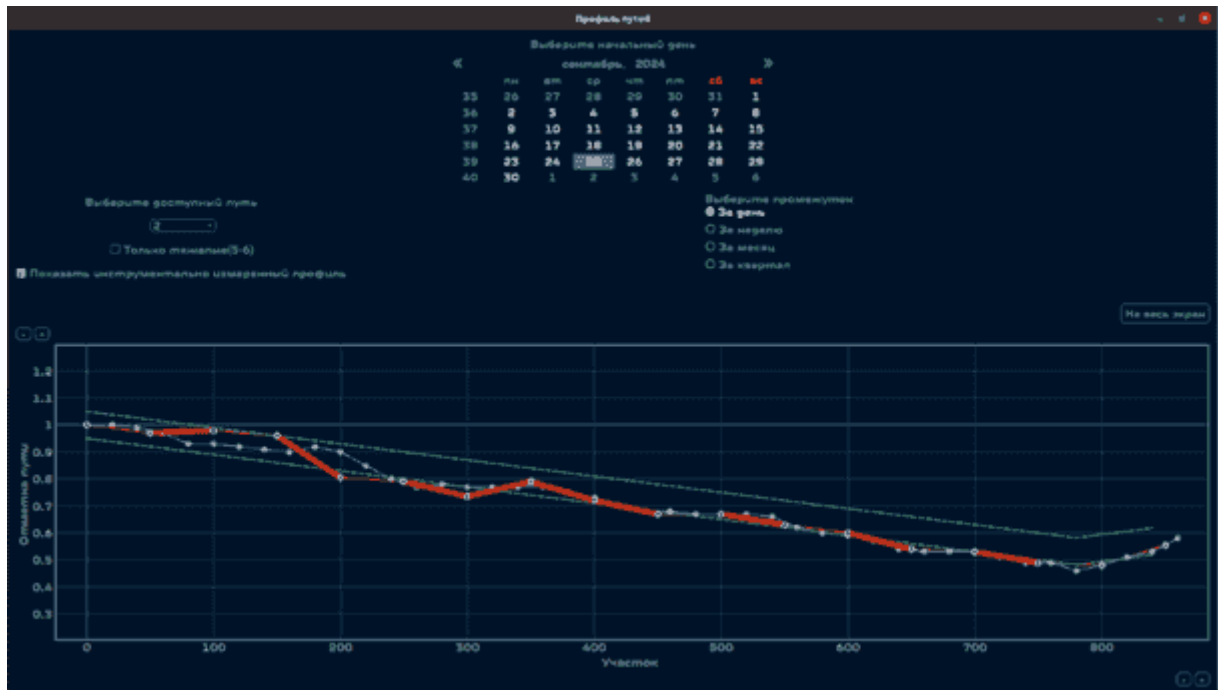


Рисунок 5. Профиль второго сортировочного пути нечетной системы ст. Кинель до выправки (25 сентября 2024 года)

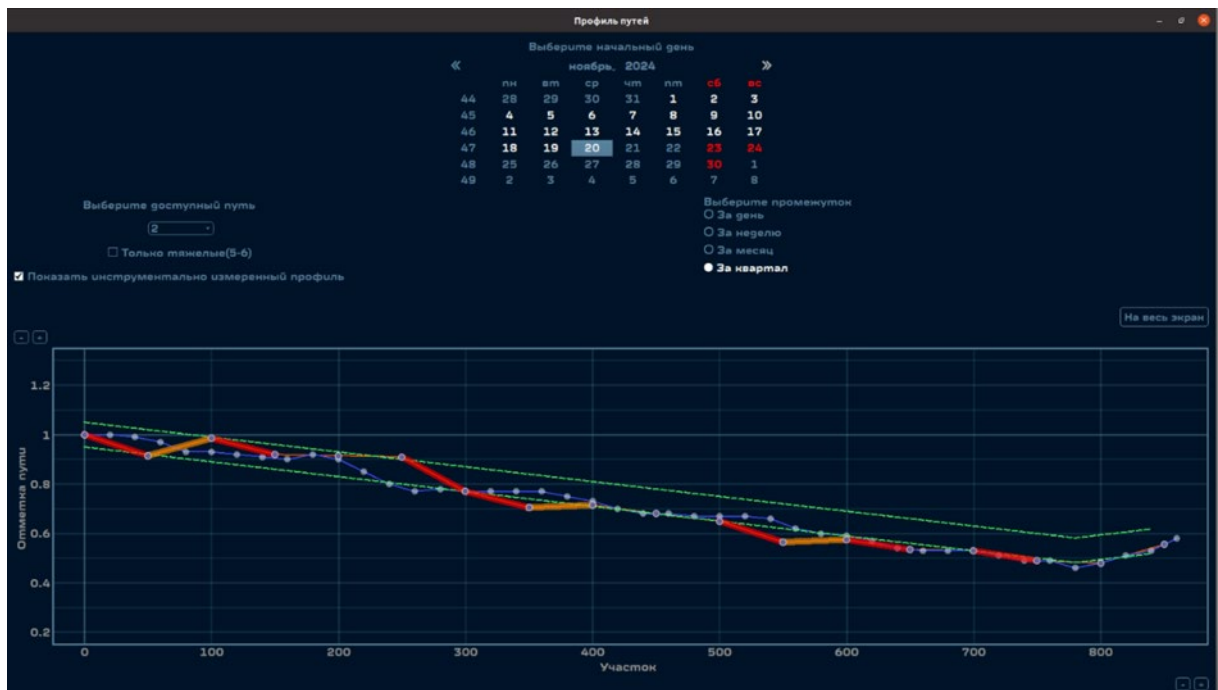


Рисунок 6. Профиль второго сортировочного пути нечетной системы ст. Кинель после выправки (20 ноября 2024 года)

Графика на рис. 6 иллюстрирует актуальность выправки сортировочных путей на основе данных КЗСП, так как график стал выше, а небезопасные соударения исчезли на проблемном участке после адресной выправки.

Заключение

Результаты исследования доказывают, что комплекс КЗСП может быть использован в целях перехода от планового обслуживания сортировочных путей к обслуживанию по состоянию. Обслуживание по состоянию освободит временные и материальные ресурсы на избыточную съемку пути, а также обеспечит эффективность процесса выправки сортировочных путей. В результате будет увеличена скорость расформирования в автоматизированных системах управления сортировочным процессом с сохранением безопасности движения за счет сокращения небезопасных соударений и неэффективных остановок в сортировочном парке. В 2025 г. Комплекс КЗСП планируется к запуску на обеих системах станции Челябинск-Главный, где пройдет последующая эксплуатация функции диагностики продольного профиля. В дальнейшем также планируется реализация отчетности согласно Методическим указаниям по составлению продольных профилей станционных путей и перегонов (ЦПТ-54/26) для легитимности выходных данных диагностики.

Список использованной литературы

1. Хатламаджиян А.Е., Ольгейзер И.А., Суханов А.В., Борисов В.В. Компьютерное зрение для контроля сортировочных процессов/ А.Е. Хатламаджиян [и др.] //Автоматика, связь, информатика. – 2021. – №. 3. – С. 8-11.
2. Рыбалкин В.И. Структура построения устройства управления прицельным торможением / В.И. Рыбалкин //Современные технологии обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте. – 2022. – С. 173-176.
3. Андреев В.Е., Долгий А.И., Кудюкин В.В., Хатламаджиян А.Е., Гришаев С.Ю., Ольгейзер И.А. Цифровая железнодорожная станция – от концепции к реальному внедрению. / В.Е. Андреев [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 9. – С. 2-6.
4. Ольгейзер И. А. Безопасность роспуска составов на сортировочных горках. Граничные условия функционирования при эксплуатации горочных систем автоматизации. – 2019.
5. Дагддиян Г. Д., Швалов Д. В., Давыдов Ю. В. Исследование причин возникновения "окон" на путях сортировочного парка //Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – №. 1. – С. 53-60.
6. Долгий А.И., Хатламаджиян А.Е., Ольгейзер И.А., Суханов А.В., Корниенко К.И. Инновационные алгоритмы машинного зрения для диагностики продольного профиля сортировочных путей/ А.И. Долгий [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 8. – С. 7–9. DOI: 10.34649/AT.2022.8.8.002.
7. Корниенко К.И. Совершенствование метода расчета продольного профиля сортировочных путей железнодорожных станций: диссертация ... кандидата технических наук: 05.22.08 / Корниенко Константин Ильич; [Место защиты: Новосибирск федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»] – Новосибирск, 2019. – С. 170.
8. Методика ОАО «РЖД» от 15.12.2017 №1339 (ред. от 20.02.2018) «Методика аттестации железнодорожных станций с автоматизированными горками с позиции обеспечения безопасности при роспуске вагонов-цистерн для перевозки опасных грузов 2 класса с классификационным шифром 2112 и номерами ООН 1011, 1965, 1969, 1978 опасности (пропанобутановые смеси)» – С. 12.
9. Zhang Y. et al. Real-time vehicle detection based on improved yolo v5 //Sustainability. – 2022. – Т. 14. – №. 19. – С. 12274.
10. Меншутина Е. Р., Жебанов А. В. Предиктивная аналитика при ремонте колёсных пар. – 2022.