

А. А. Дурмагамбетов¹, Г. И. Ильяшева², К. Ж. Раимбеков³

¹*Евразийский Национальный Университет им. Л. Н. Гумилёва, Астана, Казахстан*

²*Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан*

³*Академия гражданской защиты имени Малика Габдуллина МЧС Республики
Казахстан, Кокшетау, Казахстан*

МЕТОДОЛОГИЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СХОДАМИ ПОЕЗДОВ, НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Аннотация. В статье рассматривается методология предупреждения аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте, в частности сходов подвижного состава, на основе внедрения цифровой модели пути (Digital Track Model, DTM). Предложена математическая модель, связывающая погрешности геометрии рельсового пути с ростом эксплуатационных и восстановительных затрат. Показано, что даже незначительное увеличение ошибок кривизны приводит к кратному росту объёмов ремонтных работ и повышению динамических нагрузок на элементы инфраструктуры и подвижной состав. Установлено, что применение DTM с точностью порядка 1 см позволяет снизить расходы на содержание пути до 20–50 %, повысить устойчивость движения и уменьшить вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций. Полученные результаты обосновывают целесообразность использования цифрового контроля геометрии как элемента системы управления рисками и профилактики аварий на железных дорогах.

Ключевые слова: цифровая модель пути, геометрия железнодорожного пути, сход поездов, мониторинг инфраструктуры, управление рисками, предупреждение чрезвычайных ситуаций, кривизна трассы.

Введение

Железнодорожный транспорт относится к объектам повышенной опасности и играет ключевую роль в обеспечении экономической и транспортной безопасности государства. Нарушения геометрии пути, возникающие в процессе длительной эксплуатации, являются одной из основных причин деградации инфраструктуры, ограничения скоростей движения и сходов подвижного состава [1].

Для органов, осуществляющих функции по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, особую значимость приобретает раннее выявление опасных участков и переход от реактивного ремонта к превентивному управлению состоянием пути. Современные мировые тенденции развития железнодорожной отрасли ориентированы на создание цифровых двойников объектов инфраструктуры, обеспечивающих постоянный мониторинг их параметров [2].

Экономика Республики Казахстан в значительной степени опирается на железнодорожные перевозки, определяющие транзитный потенциал страны. В условиях возрастающей конкуренции между международными транспортными коридорами особое значение приобретает повышение надёжности и безопасности перевозочного процесса. Вместе с тем импортные технологии цифровизации

являются дорогостоящими, что требует разработки экономически обоснованных подходов с быстрым сроком окупаемости [3].

Целью настоящей работы является обоснование применения цифровой модели железнодорожного пути (DTM) как инструмента повышения безопасности движения и предупреждения аварийных ситуаций на основе математического анализа влияния погрешностей геометрии на эксплуатационные затраты.

Обоснование необходимости цифрового контроля геометрии

Геометрия пути определяет величину динамических воздействий на рельсы, шпалы, балласт и подвижной состав. Увеличение кривизны вызывает рост боковых сил, ускоренный износ элементов пути и колёсных пар, а также повышение вероятности сходов [4].

Для оптимального управления инфраструктурой необходимо представить все объекты железнодорожной системы в цифровом виде и синхронизировать модель с реальным состоянием. Такая цифровая модель пути позволяет:

- осуществлять непрерывный контроль проектного положения рельсовой колеи;
- выявлять зоны повышенного риска;
- планировать ремонтные воздействия на основе объективных данных;
- снижать количество внеплановых работ;
- повышать устойчивость движения.

Математическая модель экономической эффективности цифровизации

Приведем математическую модель, которая позволяет количественно оценить влияние ошибок геометрии на затраты по содержанию пути.

Введем следующие понятия: A – объём работ по поддержанию пути в нормативном состоянии, A^* – объём работы, выполняемый подвижным составом. Известно, что они находятся в прямой зависимости:

$$A = k_1 * A^*.$$

Стоимость работ пропорциональна их объёму

$$C_A = k_2 * A = k_2 * k_1 * A^*.$$

Рассмотрим структуру работ, производимых составами над железными дорогами, как известно [4], работа подвижного состава представляет собой интеграл сил вдоль траектории:

$$C_A = k_1 * k_2 * A = k_2 * k_1 * \int_0^L F(s)ds, \quad (1)$$

где L – это протяженность пути s .

Полагая, что $k_1 * k_2 = 1$ и используя выражение ускорения

$$a = v^2/R,$$

получаем

$$C_A = \int_0^L F(s)ds = \int_0^L mads = \int_0^L mv^2/Rds, \quad (2)$$

где m – масса состава, v – скорость, R – радиус кривизны пути.

Поскольку масса и скорость не подлежат оперативному управлению, единственным регулируемым параметром остаётся кривизна пути. Поэтому, критерием минимизации затрат на содержание пути будет являться уменьшение кривизны пути. Каким образом уменьшается кривизна пути? Кривизна пути задается проектным положением пути. Возникает вопрос, имеется ли точное проектное положение пути, и с какой точностью и оптимальностью существует данное проектное положение пути. Повторяя в терминах ЦМП, мы приходим к вопросам её точности, оптимальности и стоимости её создания. Очевидно, чем более точную модель мы захотим построить, тем она дороже будет. Рассмотрим вопрос о повышении стоимости ремонтных работ при увеличении кривизны пути.

Далее рассматриваются два варианта:

$$\frac{1}{R} \text{ и } \frac{1}{R_{\epsilon}}.$$

Соответственно стоимости ремонтных работ будут определяться в виде:

$$C_A = \int_0^L mv^2/R ds, \quad (3)$$

$$C_{A_{\epsilon}} = \int_0^L mv^2/R_{\epsilon} ds. \quad (4)$$

Превышение затрат при наличии кривизны будет вычисляться по формуле [2]:

$$\Delta_{\epsilon} = C_{A_{\epsilon}} - C_A, \quad (5)$$

$$\Delta_{\epsilon} = \int_0^L [mv^2/R_{\epsilon} - mv^2/R] ds, \quad (6)$$

что приводит к выражению:

$$\Delta_{\epsilon} = mv^2 \int_0^L \left[\frac{1}{R_{\epsilon}} - \frac{1}{R} \right] ds, \quad (7)$$

$$\Delta_{\epsilon} = mv^2 \int_0^L \frac{R - R_{\epsilon}}{R_{\epsilon} R} ds, \quad (8)$$

$$\Delta_{\epsilon} = mv^2 \int_0^L \frac{R/R_{\epsilon} - 1}{R} ds. \quad (9)$$

Так как относительно железных дорог все средние существенные характеристики определяют попикетно, то и последнее выражение запишем попикетно [5]:

$$\Delta_{\epsilon} = mv^2 \sum_1^N \int_0^{P_i} \frac{R/R_{\epsilon} - 1}{R} ds, \quad (10)$$

где P_i – протяженность i –го пикета, $i = 1 \dots N$.

По теореме Лагранжа [3] внутри пикетов существуют точки θ_i , для которых

$$\Delta_{\epsilon} = \sum_1^N \left(\frac{R(\theta_i)}{R_{\epsilon}(\theta_i)} - 1 \right) mv^2 \int_0^L \frac{1}{R} ds. \quad (11)$$

Примем следующую гипотезу: расстройство дороги в среднем идет одинаково по пикетам,

$$\Delta_{\epsilon} = \left(\frac{R(\theta_i)}{R_{\epsilon}(\theta_i)} - 1 \right) \sum_1^N m v^2 \int_0^L \frac{1}{R} ds \quad (12)$$

и в итоге получим

$$\Delta_{\epsilon} = \left(\frac{R(\theta_i)}{R_{\epsilon}(\theta_i)} - 1 \right) C_A. \quad (13)$$

Таким образом, относительное увеличение кривизны прямо пропорционально росту затрат. Оценим коэффициент пропорциональности

$$k_{\delta} = \left(\frac{R(\theta_i)}{R_{\epsilon}(\theta_i)} - 1 \right)$$

$$\Delta_{\epsilon} = k_{\delta} C_A$$

Из последних формул следует, что при увеличении кривизны на один процент вытекает увеличение стоимости ремонтных работ на один процент. Таким образом, расчеты экономической целесообразности ЦМП зависят от процента кривизны дороги в текущем состоянии и возможности контроля ремонтных работ. Рассмотрим какая погрешность кривизны возникает на отрезке $L=100$ метров [5].

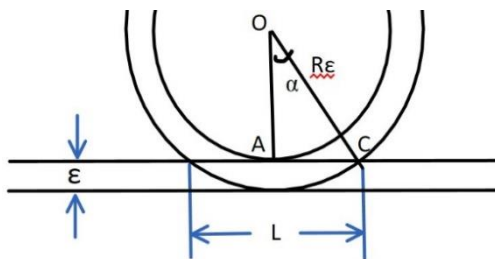


Рисунок 1 - Погрешность кривизны железнодорожного полотна

Согласно рисунку 1, имеем следующие уравнения:

$$R_{\epsilon} - R_{\epsilon} \cos(\alpha) = \epsilon, \quad R_{\epsilon} \sin(\alpha) = L,$$

из которых для участка длиной ($L=100$ м) получено:

$$R_{\epsilon} = \frac{L^2}{(8\epsilon)} + \frac{\epsilon^2}{2}.$$

В последнем выражении в силу малости ϵ можем пренебречь членом $\epsilon^2/2$, тогда получим

$$R_{\epsilon} = \frac{L^2}{(8\epsilon)}.$$

Возьмем в виде стандартной ошибку

$$\epsilon_0 = 0,01 \text{ м},$$

тогда при ошибке

$$\epsilon_1 = 0,02 \text{ м}$$

Получим

$$k_\delta = \left(\frac{R_{\epsilon_0}}{R_{\epsilon_1}(\theta^*)} - 1 \right), \quad (14)$$

$$k_\delta = \left(\frac{L^2}{8\epsilon_0} - \frac{L^2}{8\epsilon_1} - 1 \right), \quad (15)$$

$$k_\delta = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1} - 1 \right) \quad (16)$$

После выполнения простых расчетов коэффициента пропорциональности следует вывод, что при переходе от ошибки 1 см к 2 см стоимость ремонтных работ увеличивается в два раза, а при ошибке 5 см — в пять раз.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что даже сантиметровые отклонения проектной геометрии приводят к резкому росту эксплуатационных затрат и динамических нагрузок, что напрямую связано с риском возникновения аварийных ситуаций.

Внедрение DTM с точностью порядка 1 см обеспечивает:

- снижение затрат на содержание пути на 20–50 %;
- повышение долговечности инфраструктуры;
- сокращение количества технологических «окон»;
- уменьшение износа подвижного состава примерно на 20 %;
- возможность оптимизации скоростных режимов.

С точки зрения системы предупреждения чрезвычайных ситуаций цифровая модель пути обеспечивает переход к превентивному управлению состоянием инфраструктуры и раннему выявлению опасных зон [6].

Заключение

В результате проведенного исследования показано, что цифровой контроль геометрии железнодорожного пути является эффективным инструментом снижения эксплуатационных затрат и предупреждения сходов подвижного состава. При затратах на создание и сопровождение DTM порядка 1 % от годовых расходов на ремонт достигается многократный экономический и эксплуатационный эффект.

Применение DTM следует рассматривать как важный элемент системы управления рисками на железнодорожном транспорте и как действенную меру профилактики чрезвычайных ситуаций, обеспечивающую повышение безопасности и устойчивости перевозочного процесса.

Список литературы

1. Исследовательский совет департамента коммуникаций международного союза железных дорог / Ред.: Д. Шут, Ж. Вишневыски // Сборник публикаций «Глобальное видение развития железных дорог» - Париж, ноябрь, 2015. – С.7-11. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://uic.org/IMG/pdf/global_vision_for_railway_development.pdf – Сегменты железнодорожного рынка и их будущие тенденции.
2. Галар Д., Карим Р., Кумар Ю. Глобальный железнодорожный обзор. [Электронный ресурс]. - 10 August, 2017 - Режим доступа: <https://www.globalrailwayreview.com/article/61515/big-data-railway-operations-maintenance-2/> - Большие данные в железнодорожной эксплуатации и техническом обслуживании.
3. Голев В.В., Шарипов Г.А., Тимиргали А. Особенности ликвидации пожаров и дорожно-транспортных происшествий на транспорте // Наука и образование в гражданской защите. – 2023. – № 4 (52). – С. 30–36.
4. Джойл Роббин, Дитмар Саламон. Введение в дифференциальную геометрию / англ. издательство «UW Madison», Цюрих, 2021. – 439 с.
5. Уолтер Рудин. Принципы математического анализа / англ.; под ред. У. Тед Мартина, Е.Н. Спанира, Г. Спрингера, П.Д. Дэвиса – издательство «R.R.Donnelley & Sons Company», США, 1976. – 362 с. Интернет-журнал.
6. Kaewunruen S., Lian Q., Chen Y. Digital Twin Technologies for Managing Railway Infrastructure and Enhancing Safety // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 5. – Article 2458.

References

1. Issledovatel'skij sovet departamenta kommunikacij mezhdunarodnogo soyuza zhelezných dorog / Red.: D. SHut, ZH. Vishnevski // Sbornik publikacij «Global'noe videnie razvitiya zhelezných dorog» - Parizh, noyabr', 2015. – S.7-11. – [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://uic.org/IMG/pdf/global_vision_for_railway_development.pdf – Segmenty zheleznodorozhnogo rynka i ih budushchie tendencii.
2. Galar D., Karim R., Kumar YU. Global'nyj zheleznodorozhnyj obzor. [Elektronnyj resurs] - 10 August, 2017 - Rezhim dostupa: <https://www.globalrailwayreview.com/article/61515/big-data-railway-operations-maintenance-2/> - Bol'shie dannye v zheleznodorozhnoj ekspluatatsii i tekhnicheskome obsluzhivanii.
3. Golev V.V., SHaripov G.A., Timirgali A. Osobennosti likvidatsii pozharov i dorozhno-transportnyh proisshestvij na transporte // Nauka i obrazovanie v grazhdanskoj zashchite. – 2023. – № 4 (52). – S. 30–36.
4. Dzhojl Robbin, Ditmar Salamon. Vvedenie v differencial'nuyu geometriyu / angl. - izdatel'stvo «UW Madison», Cyurih, 2021. – 439 s.
5. Uolter Rudin. Principy matematicheskogo analiza / angl.; pod red. U. Ted Martina, E.N. Spanira, G. Springera, P.D. Devisa – izdatel'stvo «R.R.Donnelley & Sons Company», SSHA, 1976. – 362 s. Internet-zhurnal.
6. Kaewunruen S., Lian Q., Chen Y. Digital Twin Technologies for Managing Railway Infrastructure and Enhancing Safety // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 5. – Article 2458.

А. А. Дұрмағамбетов¹, Г. И. Ильяшева², К. Ж. Раимбеков³

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан

³Қазақстан Республикасы ТЖМ Мәлік Ғабдуллин атындағы Азаматтық қорғау академиясы, Көкшетау, Қазақстан

ТЕМІРЖОЛ ЖОЛЫНЫҢ ГЕОМЕТРИЯСЫН ЦИФРЛЫҚ БАҚЫЛАУ НЕГІЗІНДЕ ПОЙЫЗДАРДЫҢ РЕЛЬСТЕН ШЫҒУЫНАН ТУЫНДАЙТЫН ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙЛАРДЫҢ АЛДЫН АЛУ ӘДІСНАМАСЫ

Аңдатпа. Мақалада теміржол көлігіндегі авариялық жағдайлардың, атап айтқанда жылжымалы құрамның рельстен шығуының алдын алу әдістемесі теміржол жолының цифрлық моделін (Digital Track Model, DTM) енгізу негізінде қарастырылады. Рельстік жол геометриясындағы қателіктер мен пайдалану және қалпына келтіру шығындарының өсуі арасындағы байланысты сипаттайтын математикалық модель ұсынылған. Қисықтық қателіктерінің тіпті аз ғана артуы жөндеу жұмыстары көлемінің бірнеше есе өсуіне және инфрақұрылым элементтері мен жылжымалы құрамға түсетін динамикалық жүктемелердің артуына әкелетіні көрсетілген. Дәлдігі шамамен 1 см болатын DTM қолдану жолды ұстауға кететін шығындарды 20–50 % дейін азайтуға, қозғалыс тұрақтылығын арттыруға және төтенше жағдайлардың туындау ықтималдығын төмендетуге мүмкіндік беретіні анықталған. Алынған нәтижелер теміржол көлігінде тәуекелдерді басқару және авариялардың алдын алу жүйесінің элементі ретінде жол геометриясын цифрлық бақылауды қолданудың мақсатқа сай екенін негіздейді.

Түйінді сөздер: жолдың цифрлық моделі, теміржол жолының геометриясы, пойыздардың рельстен шығуы, инфрақұрылымды мониторингтеу, тәуекелдерді басқару, төтенше жағдайлардың алдын алу, трасса қисықтығы.

A. A. Durmagambetov¹, G. I. Ilyasheva², K. ZH. Raimbekov³

¹L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Sh. Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan

³Malik Gabdullin Academy of Civil Protection of the MES of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan

METHODOLOGY FOR THE PREVENTION OF EMERGENCIES CAUSED BY TRAIN DERAILMENTS BASED ON DIGITAL MONITORING OF RAILWAY TRACK GEOMETRY

Abstract. The article examines a methodology for preventing emergency situations in railway transport, in particular derailments of rolling stock, based on the implementation of a Digital Track Model (DTM). A mathematical model is proposed that relates errors in track geometry to the growth of operational and recovery costs. It is shown that even a slight increase in curvature errors leads to a multiple increase in the volume of maintenance work and to higher dynamic loads on infrastructure components and rolling stock. It is established that the use of a DTM with an accuracy of about 1 cm makes it possible to reduce track maintenance costs by 20–50 %, improve traffic stability, and decrease the probability of emergency situations. The obtained results substantiate the feasibility of using digital control of track geometry as an element of risk management and accident prevention systems in railways.

Keywords: digital track model, railway track geometry, train derailments, infrastructure monitoring, risk management, emergency prevention, track curvature.

Сведения об авторах / Information about the authors

Дурмагамбетов Асет Асхатбекович – кандидат физико-математических наук, преподаватель Евразийского Национального Университета им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан. E-mail: asset.durmagambet@gmail.com

Ильяшева Гулжамал Ирановна – кандидат физико-математических наук, сеньор-лектор НАО «Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова», Кокшетау, Казахстан. E-mail: gulzhamal.ilyasheva@gmail.com

Раимбеков Кендебай Жанабилевич – кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор (доцент), доцент кафедры общетехнических дисциплин, информационных систем и технологий Академии гражданской защиты им. Малика Габдуллина МЧС Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан. E-mail: kendebai_63@mail.ru

Aset A. Durmagambetov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lecturer at the L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan. E-mail: asset.durmagambet@gmail.com

Gulzhamal I. Ilyasheva – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer at the Sh. Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan. E-mail: gulzhamal.ilyasheva@gmail.com

Kendebai Zh. Raimbekov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines, Information Systems and Technologies at the Malik Gabdullin Academy of Civil Protection of the MES of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan. E-mail: kendebai_63@mail.ru