

УДК 625.151.2

П. В. КОВТУН, кандидат технических наук, А. Н. СТАРОВОЙТОВ, кандидат физико-математических наук, О. В. ОСИПОВА, В. В. РОМАНЕНКО, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЕЗДНОЙ НАГРУЗКИ НА СТРЕЛОЧНЫЕ ПЕРЕВОДЫ

Объектом исследования является ширина рельсовой колеи на стрелочном переводе. Приводится разработка вероятностной модели накопления расстройств ширины колеи в пределах стрелочных переводов. Предлагаемая методика позволит в полной мере оценить состояние эксплуатируемых, опытных, контрольных переводов и их отдельных узлов и элементов, а также спрогнозировать и предупредить возможные расстроения контролируемых параметров.

Изменения состояния элементов стрелочных переводов и самих переводов в целом является объективным процессом, непрерывно протекающим во времени. На ход этого процесса “старения” переводов существенно влияют условия эксплуатации (нагрузки от колес на рельсы, скорости движения, грузонапряженность участка и т. д.), свойства материалов, из которых изготовлены элементы конструкции, и другие факторы. Основной целью статистических измерений является накопление материалов, необходимых для достоверной оценки надежности эксплуатации стрелочных переводов.

В качестве объектов наблюдений были выбраны 38 стрелочных переводов типа Р65 колеи 1520 мм, уложенных в Гомельском узле. Все опытные переводы уложены на щебеночном балласте, 13 из них – на деревянных брусках, 25 – на железобетонных. Скорость движения пассажирских и грузовых поездов – 40 км/ч.

Замеры на опытных переводах производились ежемесячно в течение полугода. За это время опытные переводы пропустили до 100 млн т брутто груза. Некоторые стрелочные переводы во время наблюдений были заменены на новые. Всего было проведено пять циклов обмеров и получено 190 значений каждого измеряемого параметра. На переводах визуально устанавливалось: наличие трещин, раковин, наплывов металла, выколов головки рельса; состояние переводных брусков, элементов креплений и деталей переводного механизма. Особое внимание уделялось выплескам пути и кустовой гнилости брусков.

Как известно, на безопасность движения и комфортность езды наибольшее влияние оказывают отступления по содержанию стрелочных переводов в горизонтальной плоскости. На исследуемых стрелочных переводах измерялась ширина колеи и положение рельсовых нитей по уровню в следующих сечениях:

- в передних стыках рамных рельсов;
- у острия остряков;
- в корне остряков на прямой и боковой пути;
- середине переводной кривой;
- конце переводной кривой;
- передних стыках крестовины на прямой и боковой пути;
- сечении сердечника 40 мм на прямой и боковой пути;
- задних стыках крестовины на прямой и боковой пути.

Для измерения ширины колеи, положения рельсовых нитей по уровню использовался путевой шаблон ПШ-1520.

Статистическая обработка данных включала в себя выполнение разведочного анализа данных и проведение множественного регрессионного анализа. Для статистической обработки исследуемых параметров использовался пакет STATGRAPHICS Centurion XV.

Одним из главных факторов, определяющих состояние стрелочных переводов в плане, является размер ширины рельсовой колеи.

В реальных условиях наблюдается весьма существенный разброс значений ширины колеи на переводах, иногда превышающий установленные пределы. Например, в зоне переднего стыка рамных рельсов максимальный разброс значений ширины колеи составляет 17 мм (1520–1537 мм); в зоне корневых устройств – по прямому направлению 19 мм (1514–1533 мм), по боковому – 16 мм (1517–1533 мм). Аналогичное положение наблюдается в зоне соединительных путей стрелочных переводов: максимальный разброс составляет по боковому пути 16 мм (1522–1538 мм). Не лучше положение в крестовинных узлах. Абсолютный максимум разброса 19 мм (1512–1531 мм) зафиксирован в заднем стыке крестовины по прямому направлению.

Результаты обработки статистических данных измерений в контролируемых сечениях показали, что по отдельным сечениям нормативным требованиям отвечают от 24 % (передний стык рамного рельса) до 93 % (крестовина в сечении сердечника 40 мм по прямому направлению) стрелочных переводов, в среднем по всем нормируемым сечениям – 72 %.

Средние значения ширины колеи наблюдаются в сторону уширения в переднем стыке рамного рельса (1526 мм) и в переднем стыке крестовины по боковому направлению (1525 мм). В остальных сечениях средние значения попадают в поля допусков (рисунк 1).

Важно отметить характерное отличие ширины колеи в зоне стрелки и соединительных путей от крестовинного узла. Если в зоне стрелки и соединительных путей абсолютное большинство стрелочных переводов имеет в контролируемых сечениях уширение рельсовой колеи (до 76 % в переднем стыке рамного рельса), то, начиная с прямой вставки и в крестовинном узле, абсолютное большинство переводов по наблюдавшимся сечениям имеет тенденцию к удержанию колеи в пределах норм (до 93 %, исключение составляет лишь передний стык крестовины по боковому пути). Это вызвано более жестким соединением всех элементов крестовинного узла с подрельсовым основанием, а также существующими наплывами рельсового металла сердечника крестовины.



Рисунок 1 – Диаграмма распределения ширины колеи по сечениям:

- допустимая ширина колеи на стрелочном переводе, мм;
- - - фактическая средняя ширина колеи на стрелочном переводе с железобетонным основанием, мм;
- · - фактическая средняя ширина колеи на стрелочном переводе с деревянным основанием, мм

Анализ данных показывает, что удельный вес размеров ширины колеи в пределах допуска для переводов на деревянных брусках в среднем составляет 66 %, а на железобетонных – 60 %. Вероятно, это обусловлено возможностью перешивки стрелочных переводов на дереве. В остальном тенденции совпадают: наиболее проблемными зонами являются сечения в переднем стыке рамного рельса (уширение до 75 % для железобетона и 68 % – для дерева) и переднем стыке крестовины по боковому пути (по 75 %).

Причиной уширения в переднем стыке рамного рельса и переднем стыке крестовины по боковому пути могут быть большие динамические воздействия на упорную рельсовую нить при следовании подвижного состава в пошерстном направлении с бокового пути стрелочного перевода. Сократить дополнительное воздействие и соответственно уменьшить уширение в указанных сечениях позволяет применение контррельс-протектора.

Распределения значений ширины колеи на стрелочных переводах носят в основном симметричный характер, близкий к нормальному закону распределения. Гистограммы распределений ширины колеи в отдельных сечениях показывают, что распределения имеют характерный максимум, как правило, совпадающий со средним значением или близкий к нему. Из сказанного видно, что система допусков по ширине колеи на стрелочных переводах соблюдается неполностью.

Проверка гипотезы о нормальном законе распределения ширины колеи S показала, что данная гипотеза согласуется с результатами измерений (значение критерия $\chi^2 = 1,83$, число степеней свободы $\nu = 5$, уровень значимости $P\text{-Value} = 0,87$). Гистограмма ширины колеи с нанесенным графиком функции плотности нормального закона распределения приведена на рисунке 2.

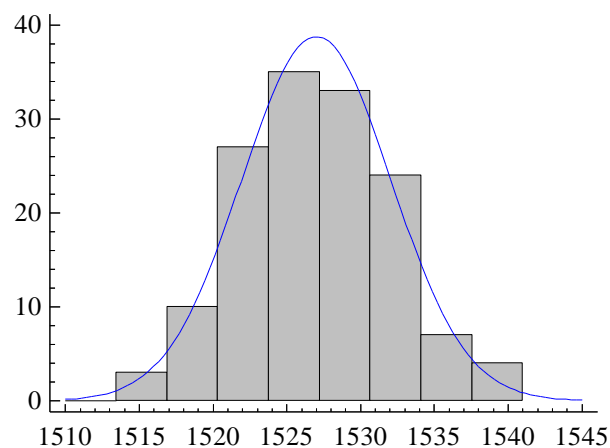


Рисунок 2 – Гистограмма ширины колеи

В общем виде ширина колеи стрелочного перевода зависит от следующих факторов: пропущенного тоннажа по переводу на момент измерения; количества замен стрелочного перевода; материала, из которого изготовлены бруска; средней скорости движения по переводу и др. Поэтому регрессионную модель ширины рельсовой колеи стрелочного перевода можно представить следующим образом:

$$S_i = \Phi(T_i, K_i, M_i, v_i, \dots, \beta) + e_i, \quad (1)$$

где S_i – ширина колеи при i -м измерении; $\Phi(x, \beta)$ – некоторая функция, зависящая от векторов $x = (T_i, K_i, M_i, v_i, \dots)$ и β – параметров модели; T_i – пропущенный тоннаж к моменту i -го измерения; K_i – количество замен стрелочного перевода до i -го измерения; M_i – фиктивная переменная, характеризующая материал, из которого изготовлены бруска ($M_i = 0$ – для деревянных и $M_i = 1$ – для железобетонных); v_i – средняя скорость движения

по стрелочному переводу к моменту i -го измерения; e_i – случайные отклонения, которые являются результатом влияния неучтенных факторов.

Исследование регрессионной модели зависит от выбранных модельных предположений. Классические предположения для множественной регрессионной модели можно найти в [6].

Аналогичные исследования показали [8], что наиболее значимое влияние на ширину рельсовой колеи стрелочного перевода оказывает пропущенный по переводу тоннаж. Поэтому рассмотрим следующую модель:

$$S_i = \Phi(T_i, \beta) + e_i. \quad (2)$$

Однако исследование по имеющимся данным регрессионной модели (2) показывает, что классическое модельное предположение о том, что случайные отклонения e_i являются независимыми случайными величинами, имеющими нормальный закон распределения с математическим ожиданием, равным нулю, и постоянной дисперсией ($e_i \sim N(0, \sigma)$), не выполняется. Проверка некоррелированности остатков чаще всего проводится с помощью критерия Дарбина-Уотсона [6]. Так, для линейной регрессионной модели со свободным членом значение критерия Дарбина-Уотсона $DW = 1,073$ уровень значимости $P\text{-Value} = 0$; коэффициент автокорреляции остатков с лагом 1 – $r_1 = 0,45$. При этом качество такого уравнения регрессии очень плохое – коэффициент детерминации $R^2 = 0,096$. Для линейной модели без свободного члена коэффициент автокорреляции остатков с лагом 1 – $r_1 = 0,72$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,628$. Как видно, качество данного уравнения регрессии лучше, но остатки остаются коррелированными. Это связано с тем, что статистические данные представляют собой серии измерений над одними и теми же стрелочными переводами, что в конечном итоге приводит к ситуации, когда следующее измерение ширины колеи S_i зависит от предыдущего S_{i-1} . То есть величины S_i , а следовательно, и случайные отклонения e_i являются зависимыми, и стандартные статистические процедуры регрессионного анализа неприменимы.

В этой связи осуществим преобразование переменных и от ширины колеи перейдем к рассмотрению интенсивности изменения ширины колеи [8]:

$$\lambda_i = \frac{S_{i+1} - S_i}{T_{i+1} - T_i}.$$

Это преобразование переменных приводит к регрессионной модели

$$\lambda_i = F(S_i, T_i, \beta) + e_i. \quad (3)$$

Простейшим видом модели (3) является множественная линейная регрессия

$$\lambda_i = \beta_0 + \beta_1 S_i + \beta_2 T_i + e_i. \quad (4)$$

Однако проверка адекватности модели (4) с помощью статистических тестов показала, что эта модель не является адекватной: $R^2 = 0,013$; значение статистики Фишера $F = 0,91$ при уровне значимости $P\text{-Value} = 0,4029$ – гипотеза об одновременном равенстве нулю параметров β_1 и β_2 согласуется с экспериментальными данными. Также следует отметить, что гипотезы о ра-

венстве нулю каждого из параметров β_1 или β_2 также не отвергаются. Таким образом, объясняющие переменные S_i и T_i в такой модели не оказывают значимого влияния на величину λ_i . Исследование остатков показывает, что предположение о нормальном распределении не выполняется (значение критерия $\chi^2 = 47,13$, число степеней свободы $\nu = 3$, уровень значимости $P\text{-Value} = 0$ – гипотеза отклоняется). На рисунке 3 приведена гистограмма остатков с нанесенным графиком функции плотности нормального закона распределения.

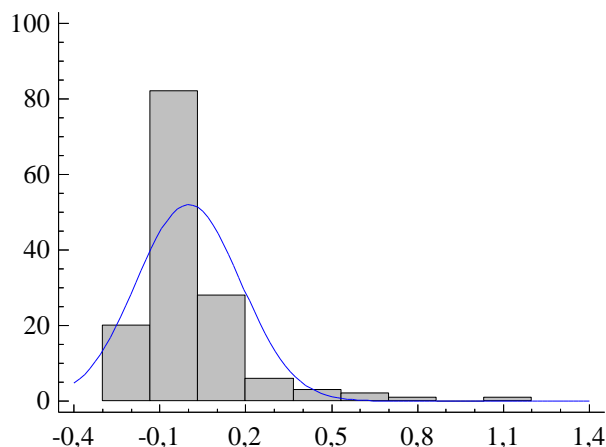


Рисунок 3 – Гистограмма остатков для модели (4)

Из гистограммы остатков видно, что распределение имеет несимметричный характер.

Также подчеркнем, что переход к рассмотрению интенсивности изменения ширины колеи устранил автокорреляцию остатков: критерий Дарбина-Уотсона $DW = 1,736$, уровень значимости $P\text{-Value} = 0,0577$; коэффициент автокорреляции $r_1 = 0,07$.

На основании вышесказанного для модели (4) было применено преобразование Бокса-Кокса [7], а также процедура пошагового отбора факторов, в результате которой переменная T_i была удалена из модели (4). При этом “лучшее” уравнение регрессии получилось, если модель (4) рассматривать без свободного члена β_0 .

В результате было получено следующее уравнение регрессии:

$$\text{BoxCox}(\lambda) = 0,000497S, \quad (5)$$

где преобразование Бокса-Кокса имеет вид

$$\text{BoxCox}(\lambda) = 1 + \frac{\lambda^{-0,0735} - 1}{-0,07375 \cdot 0,1214^{-1,07375}}. \quad (6)$$

Результаты проверки адекватности построенной модели следующие. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,982$, значение статистики Фишера $F = 7827,57$ при уровне значимости $P\text{-Value} = 0$. При исследовании остатков все модельные предположения не нарушаются. В частности, гипотеза о нормальном распределении остатков не отвергается: значение критерия $\chi^2 = 4,5$, число степеней свободы $\nu = 5$, уровень значимости $P\text{-Value} = 0,48$ (гистограмма распределения остатков приведена на рисунке 4); коэффициент автокорреляции остатков $r_1 = 0,254$.

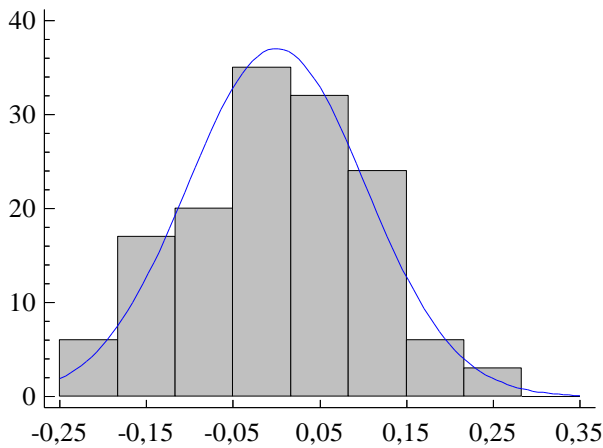


Рисунок 4 – Гистограмма остатков для модели (5)

При графическом исследовании остатков нарушений также не обнаружено. На рисунке 5 приведено графическое изображение остатков в зависимости от значений объясняющей переменной S_i . Графическое изображение остатков в зависимости от значений объясняемой переменной λ_i и порядкового номера i также имеют вид “горизонтальной полосы”.

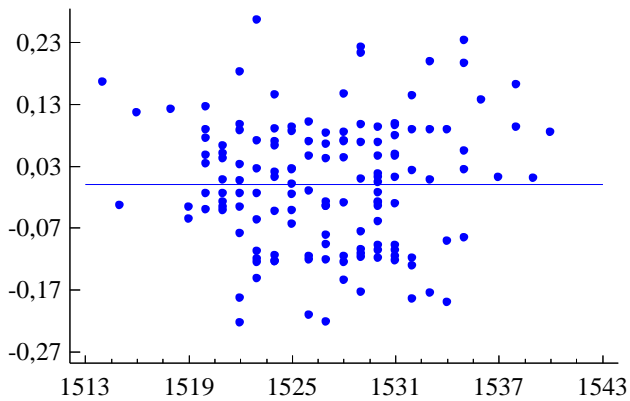


Рисунок 5 – Графическое изображение остатков в зависимости от S_i

Получено 18.09.2013

P. V. Kovtun, A. N. Starovoirov, O. V. Osipova, V. V. Romanenko. The analyse of the influence of the train load on the railway switches.

The object of research is the geometric parameters of a rail track on the railway switches. The aim of the given paper is to work out of likelihood model of accumulation of railway track disorder at the railway switches. The offered technique will allow estimating to the full a condition of maintained, skilled, control switches and their separate knots and elements, and also to predict and warn possible frustration of controllable parameters.

Таким образом, построенное уравнение регрессии (5) является адекватным.

Используя (5), (6), выразим λ через S . Получим

$$\lambda = (2,41 - 0,0007S)^{-13,559}. \quad (7)$$

Рассматривая ширину колеи S как функцию от пропущенного тоннажа T и учитывая, что $S'(T) = \lambda$, проинтегрируем (7) с начальным значением $S(0) = 1520$. Получим зависимость средней величины ширины колеи S от пропущенного тоннажа T в следующем виде:

$$S = 3439,45 - 1427,37 \cdot (74,625 - 0,01T)^{0,6868}. \quad (8)$$

Список литературы

- 1 СНБ 3.03.01-98. Железные дороги колеи 1520 мм. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва, 1998. – 27 с.
- 2 РД РБ 09150 56. 004-2000. Инструкция по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ на Белорусской железной дороге. – Минск : Белорусская ж. д., 2001. – 192 с.
- 3 Правила технической эксплуатации Белорусской железной дороги. – Минск : Белорусская ж. д., 2002. – 160 с.
- 4 **Басовский, Д. А.** Совершенствование технологии контроля состояний стрелочных переводов типа Р65 марки 1/11 на деревянных брусках : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Д. А. Басовский. – СПб., 2002. – 286 с.
- 5 **Пищик, Ф. П.** Безопасность движения на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / Ф. П. Пищик ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 267 с.
- 6 **Харин, Ю. С.** Математические и компьютерные основы статистического анализа данных и моделирования : учеб. пособие / Ю. С. Харин, В. И. Малюгин, М. С. Абрамович. – Минск : БГУ, 2008. – 455 с.
- 7 **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 1 / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М. : Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
- 8 **Ковтун, П. В.** Совершенствование допусков содержания рельсовой колеи на стрелке и соединительных путях стрелочных переводов : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / П. В. Ковтун. – Днепропетровск, 1990. – 180 л.