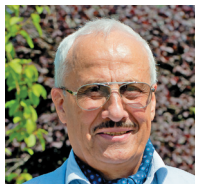
УДК 519.248
Оригинальная статья
Надежность, том 19, №3, 2019 DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-40-46

Методика определения зон (не)допустимых значений факторов для уменьшения риска схода с рельсов вагонов грузового поезда по причине излома боковой рамы[1]

Игорь Б. Шубинский, *АО «НИИАС», Российская Федерация, Москва*
Алексей М. Замышляев, *АО «НИИАС», Российская Федерация, Москва*
Алексей Н. Игнатов, *Московский авиационный институт, Российская Федерация, Москва*
Андрей И. Кибзун, *Московский авиационный институт, Российская Федерация, Москва*
Евгений О. Новожилов, *АО «НИИАС», Российская Федерация, Москва*


Игорь Б. Шубинский

Алексей М. Замышляев

Алексей Н. Игнатов

Андрей И. Кибзун

Евгений О. Новожилов

Резюме. Цель. *По данным протоколов расследования крушений/сходов с рельсов вагонов грузовых поездов в 2013-2016 гг. на сети железных дорог Российской Федерации при поездной работе сходы и крушения наиболее часто происходят по причине неисправности подвижного состава, и около трети этих сходов произошло вследствие излома боковой рамы тележки вагона. Причем среднее количество сошедших единиц подвижного состава равно 4,16 в случае сходов с рельсов по причине излома боковой рамы против 1,73 в случае сходов с рельсов из-за прочих неисправностей подвижного состава. Ранее была разработана методика, позволяющая принять решение о выбраковке определенной партии боковых рам. В то же время боковые рамы из партий, не подлежащих выбраковке, с течением времени могут изломаться. В этой связи актуальной представляется разработка методики, на основании которой можно было бы своевременно отцепить вагон в капитальный/деповской ремонт для предотвращения излома боковой рамы. Для этой цели стоит рассмотреть факторные модели оценки опасности возникновения излома. В качестве таких факторов могут выступать количество километров от последнего пункта технического обслуживания (ПТО), а также количество километров и количество дней до следующего планируемого капитального/деповского ремонта. А в качестве количественной характеристики опасности излома боковой рамы можно использовать вероятность излома боковой рамы. Однако оценка вероятности, например, в форме частоты, излома боковой рамы возможна только при наличии наблюдений, когда излом или критический дефект боковой рамы не происходил, которые не ведутся. Поэтому следует разработать индекс опасности излома боковой рамы. Так как управление частотой появления вагона на ПТО сложноосуществимо, то индекс опасности должен зависеть только от количества дней и километров до ремонта. На основе построенного индекса надо построить зоны (не)допустимых значений факторов с целью принятия решения об отцепке вагона в ремонт, если у осмотрщика вагонов на ПТО возникают сомнения в целесообразности отцепки.* **Методы.** *В работе использовались методы математического программирования.* **Результаты. Выводы.** *Был построен индекс влияния, который характеризует опасность излома боковой рамы вагона грузового поезда в зависимости от оставшегося количества дней и километров до планового ремонта вагона. На основе данного индекса были предложены две методики построения зон (не)допустимых значений факторов. Первая методика строилась на основе значений индекса влияния. Вторая строилась на основе фиксации некоторых параметров зон (не)допустимых значений факторов и выборе среди всех зон наилучших с точки зрения наименьшей опасности излома боковой рамы. Данный выбор был осуществлен путем решения задач смешанного целочисленного программирования с квадратичным ограничением.*

Ключевые слова: *риск, сход с рельсов, излом боковой рамы, индекс влияния, индекс опасности*

Формат цитирования: *Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кибзун А.И., Новожилов Е.О. Методика определения зон (не)допустимых значений факторов для уменьшения риска схода с рельсов вагонов грузового поезда по причине излома боковой рамы // Надежность. 2019. №3. С. 40-46. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-40-46*

[1] Результаты работы получены при поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта № 17-20-03050 офи_м_РЖД

Введение

Движение грузовых поездов по железнодорожной сети сопряжено с риском возникновения различных неблагоприятных событий: возгорания поездного локомотива, отцепки вагона в пути следования, столкновения между автотранспортом и поездом на железнодорожном переезде, сходом поезда с рельсов. Согласно [1] риск возникновения указанных и прочих транспортных происшествий, представляет собой функционал вероятности и ущерба. Для принятия управленческих решений по поддержанию уровня риска на допустимом уровне строится матрица риска, принципы построения которой описаны в [2].

Среди указанных транспортных происшествий и прочих как в России, так и на Западе наиболее активно исследуются сходы поездов с рельсов. Данный вид происшествий отличается тяжелыми последствиями от возникновения и происходит относительно часто. В [3] для оценки количества вагонов в сходе использовались метод максимального правдоподобия и квантильная регрессия. В [4] исследовалась задача об оценке количества вагонов в сходе в зависимости от номера первой (от головы поезда) подвижной единицы, сошедшей с рельсов. В [5] исследовалось влияние стрелочного перевода и геометрических особенностей пути на количество подвижных единиц в сходе. Отметим, что для оценки ущерба достаточно исследования протоколов транспортных происшествий, в то время как для оценки вероятности необходимо также исследовать случаи, когда транспортные происшествия не происходили. Поэтому построение факторных моделей, связывающих вероятность транспортного происшествия и значения различных факторов, крайне затруднительно. В связи с этим, как правило, рассматриваются упрощенные модели, не учитывающие, например, геометрию пути в месте схода поезда: в [6] вероятность схода с рельсов зависела от класса пути, длины состава и количества пройденных им километров, в [7] исследовалось среднее количество транспортных происшествий, зависящее от пройденного количества километров пути поездами и вагонами. Альтернативой указанным выше интегральным способам оценки вероятности для уменьшения частоты схода подвижных единиц с рельсов является построение индексов влияния [8], которые строятся на основе частоты появления факторов в случае возникновения транспортного происшествия.

Изломы боковой рамы тележки среди всех сходов/крушений вагонов грузовых поездов по причине неисправности подвижного состава приводят к наибольшим ущербам. Исследование проблемы излома боковой рамы, как правило, связано с изучением конструктивных особенностей боковой рамы и их влияния на излом [9-11]. В то же время необходимо отметить [12], где предложены границы для допустимой частоты изломов боковых рам и частоты появления дефектов, требующих ремонта. Однако данная методика направлена на выявление партии боковых рам, признаваемой бракованной, а не на предупреждение излома конкретной боковой рамы, что является предметом настоящей статьи. Поскольку полностью исключить изломы боковых рам невозможно, то необходимо минимизировать количество изломов. С этой целью логичным представляется построение оценки вероятности излома боковой рамы конкретного вагона конкретного поезда. Однако напрямую построение оценки вероятности излома боковой рамы, например, при помощи логистической или пробит-регрессии невозможно, так как статистика, когда излом боковой рамы не происходил, не ведется. В то же время аналогично [5] можно построить индекс опасности излома боковой рамы, основываясь только на данных, когда излом происходил.

Для построения индекса опасности надо выделить факторы, влияющие на частоту исследуемого транспортного происшествия, которыми можно управлять. Можно выделить три фактора: количество километров, пройденных поездом от последнего пункта технического обслуживания (ПТО), количество километров, которые вагон может проехать до следующего деповского/капитального ремонта, количество дней, которые вагон может проехать до следующего деповского/капитального ремонта. Очевидно, что с ростом расстояния от последнего ПТО и уменьшения количества дней и километров до планового ремонта растет вероятность возникновения дефекта в раме. Однако изменение частоты проведения ПТО вряд ли возможно. В то же время на ПТО возможность отправить вагон на внеплановый ремонт всегда имеет место. Поэтому далее в работе рассматриваются в качестве факторов только количество километров, которые вагон может проехать до следующего деповского/капитального ремонта, количество дней, которые вагон может проехать до следующего деповского/капитального ремонта.

В связи с вышесказанным в настоящей работе строится индекс опасности излома боковой рамы, зависящий от количества пройденных километров от последнего ПТО поездом и количеством дней от последнего деповского ремонта/момента изготовления вагона. На основании данного индекса строится матрица рисков для предупреждения излома боковой рамы.

Построение индекса опасности излома боковой рамы

Пусть имеется M протоколов деповского ремонта, выявившего необходимость в ремонте боковой рамы, в которых отражены:

d_i – количество километров, пройденных поездом от последнего ПТО, км;

s_i – количество километров, пройденных поездом после последнего деповского/капитального ремонта/постройки вагона, км;

t_i – количество дней после последнего деповского/капитального ремонта/постройки вагона;

y_i – год выпуска боковой рамы.

Поскольку качество литья у одного производителя боковых рам может варьироваться от года к году, то выделим среди общего количества протоколов протоколы по боковым рамам одного производителя одного и того же года литья и будем далее рассматривать их, предварительно перенумеровав. Пусть их общее количество равно m. Поскольку управление пробегом до очередного ПТО сложноосуществимо, в дальнейшем этот фактор рассматриваться не будет. Так как у вагонов различных типов с рамами одного производителя количество километров до очередного ремонта может быть различным, то будем рассматривать новую величину $\hat{s} = f(s)$, характеризующую оставшееся количество километров до планового ремонта и вычисляемую согласно [13]. Аналогичным образом введем величину $\hat{t} = g(t)$, характеризующую оставшееся количество дней до планового ремонта и также вычисляемую согласно [13].

Для точной оценки риска возникновения дефекта боковой рамы и последующего излома требуется оценить $P(\hat{s},\hat{t})$ – вероятность того, что некоторой боковой раме потребуется ремонт, при оставшемся до ремонта количестве дней $\hat{t}$ и количестве километров $\hat{s}$. Для оценки функции $P(\hat{s},\hat{t})$ необходимо иметь наблюдения, когда дефект в раме отсутствовал, т.е. нужно знать, в какой именно момент времени в боковой раме возник дефект. Однако такие наблюдения не ведутся. В этой связи классическую оценку вероятности в виде частоты, логистическую или пробит-регрессию построить невозможно. С похожей проблемой столкнулись авторы [8], предложив использование индексов влияния, позволяющих выявить факторы, приводящие к транспортным происшествиям, и строящихся только на основе протоколов транспортных происшествий. Аналогичным способом, предложенным в [8], построим эвристическую функцию

$$I(\hat{s},\hat{t}) \overset{\text{def}}{=} \frac{\sum_{i=1}^{m} \chi_{[\hat{s},+\infty]\times[0,+\infty]\cup[0,+\infty]\times[\hat{t},+\infty]}(s_i,t_i)}{N}, \qquad (1)$$

где

$$\chi_A(z) = \begin{cases} 1, z \in A, \\ 0, z \notin A, \end{cases}$$

а N – общее количество боковых рам некоторого года выпуска некоторого производителя, эксплуатирующихся в течение года, являющуюся заменой функции $P(\hat{s},\hat{t})$, которая служит для анализа и уменьшения риска изломов боковых рам. Функция $I(\hat{s},\hat{t})$ характеризует опасность возникновения дефекта и, как следствие, излома конкретной боковой рамы конкретного вагона и зависит от количества километров $\hat{s}$ и количества дней $\hat{t}$, оставшихся до ремонта вагона. Функция $I(\hat{s},\hat{t})$ вычисляется как отношение количества случаев, когда был обнаружен дефект у рам с меньшим количеством дней до ремонта, чем $\hat{t}$, или меньшим количеством километров до ремонта, чем $\hat{s}$, к общему числу боковых рам некоторого года выпуска некоторого производителя, эксплуатирующихся в течение года. Такой выбор данной функции $I(\hat{s},\hat{t})$ вызван тем, что если в прошлом было зафиксировано много отказов/изломов боковой рамы с меньшим количеством дней до ремонта, чем $\hat{t}$, или меньшим количеством километров до ремонта, чем $\hat{s}$, то опасность излома боковой рамы высока.

Опишем свойства функции $I(\hat{s},\hat{t})$:

(i) функция $I(\hat{s},\hat{t})$ монотонно не возрастает по каждому из своих параметров;

(ii) $I(+\infty,+\infty) = 0$;

(iii) $\forall \hat{s} \geq 0 \;\; \forall \hat{t} \geq 0 \;\; I(\hat{s},0) = I(0,\hat{t}) = \max\limits_{\hat{s}\geq 0,\hat{t}\geq 0} I(\hat{s},\hat{t}) = m/N.$

Прокомментируем указанные свойства. Свойство (i) гарантирует то, что с уменьшением количества дней или километров до ремонта опасность возникновения дефекта не уменьшится. Отметим, что и функция $P(\hat{s},\hat{t})$ монотонно не возрастает по каждому из своих параметров, поскольку физические свойства боковой рамы не улучшаются с ростом пробега. Свойство (ii) гарантирует, что после ремонта опасность будет равна нулю (ремонт предполагается полностью устраняющим дефекты). Свойство (iii) гарантирует, что максимальное значение индекса опасности достигается на максимально возможной дистанции или максимально возможном количестве дней без ремонта.

Нахождение зон (не)допустимых значений факторов

Согласно [1] матрица риска это инструмент, позволяющий ранжировать и отражать риски путем определения уровней частот и тяжести последствий. По сути, матрица риска – это функция, определенная на пространстве, составленном из вероятности транспортного происшествия, и ущерба, позволяющая принимать управленческие решения по снижению риска транспортного происшествия. Указанная функция имеет четыре значения и таким образом делит пространство вероятности и ущерба на четыре связные области: зона не принимаемого в расчет риска, зона допустимого риска, зона нежелательного риска, зона критического риска. Каждая из этих зон характеризует необходимость принятия мер для уменьшения риска происшествия. Границы этих зон могут быть как гладкими [1], так и негладкими [14]. При этом, как правило, такая матрица применяется для стратегического планирования и управления, в то время как для оперативного управления недостаточно только частоты происшествий и удельного ущерба за год от некоторого происшествия. В этой связи актуально построение зон (не)допустимых значений факторов, влияющих на частоту и ущерб от транспортных происшествий, как это было сделано в [14]. Введем обозначения:

D_1 – зона не принимаемого в расчет риска;

D_2 – зона допустимого риска;

D_3 – зона нежелательного риска;

D_4 – зона критического риска.

Вначале построим эти зоны только на основе индекса опасности (1)

$D_1 = \{(\hat{s},\hat{t}) : 0 \le I(\hat{s},\hat{t}) < i_1\};$

$D_2 = \{(\hat{s},\hat{t}) : i_1 \le I(\hat{s},\hat{t}) < i_2\};$

$D_3 = \{(\hat{s},\hat{t}) : i_2 \le I(\hat{s},\hat{t}) < i_3\};$

$D_4 = \{(\hat{s},\hat{t}) : i_3 \le I(\hat{s},\hat{t})\},$

где $i_1<i_2<i_3$ – некоторые числа. Эти числа можно задавать из экономических соображений. Пусть c_1 – средняя стоимость ремонта деповского/капитального ремонта, c_2 – средний убыток от простаивания вагона в ремонте, а c_3 – средний ущерб при сходе вагонов/крушении грузового поезда по причине излома боковой рамы. Очевидно, что если для некоторой точки $(\hat{s},\hat{t})$ риск излома боковой рамы превышает стоимость ремонта и ущерба от простаивания вагона, то эта точка должна попадать в зону нежелательного или критического риска. В этой связи можно положить $i_1 = \frac{1}{2}\frac{c_1+c_2}{c_3}$, $i_2 = \frac{c_1+c_2}{c_3}$, $i_3 = \frac{3}{2}\frac{c_1+c_2}{c_3}$.

Отметим, что другим подходом к определению зон (не)допустимых значений факторов является фиксация некоторых параметров зон (например, площади) и поиск на плоскости $\hat{t}O\hat{s}$ наилучших таких зон. Для этого будем строить зоны (не)допустимых значений факторов в виде, указанном на рис. 1.

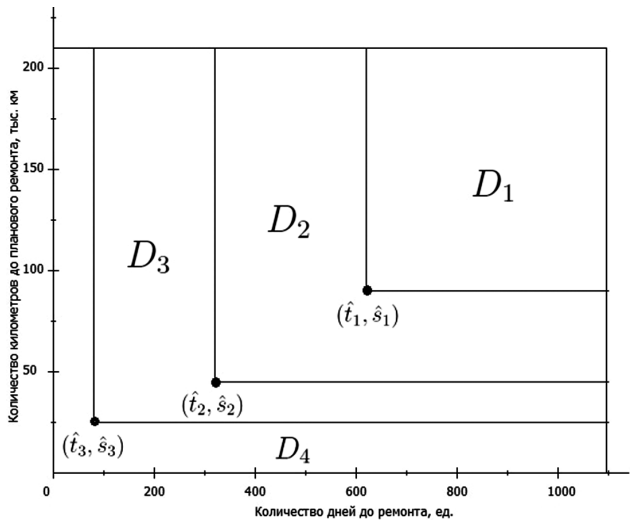


Рисунок 1 – Специальный вид диаграммы зон (не)допустимых значений факторов.

Причем

$D_1 = (\hat{s}^1, 210000] \times (\hat{t}^1, 1095],$

$D_2 = (\hat{s}^2, 210000] \times (\hat{t}^2, 1095] \cap D_1,$

$D_3 = (\hat{s}^3, 210000] \times (\hat{t}^3, 1095] \cap D_1 \cap D_2,$

$D_4 = [0, 210000] \times [0, 1095] \cap D_1 \cap D_2 \cap D_3,$

где величины $\hat{s}^1 \ge \hat{s}^2 \ge \hat{s}^3, \hat{t}^1 \ge \hat{t}^2 \ge \hat{t}^3$ подлежат определению.

Для определения $\hat{s}^j, \hat{t}^j$, а по сути границ множеств D_j, отметим, что существует бесконечно много множеств D_j одинаковой площади. При этом каждое такое множество характеризуется определенным значением максимума индекса опасности на нем. В этой связи будем искать такие множества D_j, чтобы

$$S_{D_1} \ge s_1, S_{D_1 \cup D_2} \ge s_2, S_{D_1 \cup D_2 \cup D_3} \ge s_3,$$

где $s_1<s_2<s_3$ – некоторые наперед заданные параметры. Данные параметры могут быть заданы, например, из геометрических ограничений: $s_1 = \frac{1}{4}S, s_2 = \frac{2}{4}S, s_3 = \frac{3}{4}S$, где $S = S_{D_1 \cup D_2 \cup D_3 \cup D_4}$. При этом на оптимальных множествах D_j максимальное значение индекса опасности должно быть наименьшим среди всех остальных множеств такой же площади. Учитывая вышесказанное, задача по поиску параметров $\hat{s}^1, \hat{t}^1$ принимает вид

$$\max_{\hat{s}^1 < \hat{s} \le 210000, \hat{t}^1 < \hat{t} \le 1095} I(\hat{s},\hat{t}) \to \min_{\hat{s}^1 \ge 0, \hat{t}^1 \ge 0}. \quad (2)$$

с ограничением

$$(210000 - \hat{s}^1)(1095 - \hat{t}^1) \ge s^1. \quad (3)$$

Задача (2) при ограничении (3) является задачей нелинейного программирования, что затрудняет поиск ее решения. Поэтому путем введения целочисленных $\delta_i \in \{0,1\}$ переменных упростим эту задачу, $i = \overline{1,M}$. Переменная δ_i равна нулю, если в i-м протоколе среди m рассматриваемых зафиксировано, что $\hat{s}^1 \ge \hat{s}_i$ и $\hat{t}^1 \ge \hat{t}_i$, и единице в обратном случае. С использованием переменных δ_i заключаем, что задача (2) при ограничении (3) сводится к задаче

$$\sum_{i=1}^{m} \delta_i \to \min_{210000 \ge \hat{s}^1 \ge 0, 1095 \ge \hat{t}^1 \ge 0, \delta_i \in \{0,1\}} \quad (4)$$

при ограничениях

$$(1-\delta_i)\hat{s}_i \le \hat{s}^1, i = \overline{1,m}, \quad (5)$$

$$(1-\delta_i)\hat{t}_i \le \hat{t}^1, i = \overline{1,m} \quad (6)$$

и ограничении (3). Пусть s_1^* и t_1^* – точки, задающие границу множества D_1, полученные при решении задачи (4) при ограничениях (3), (5)-(6). Тогда аналогичным образом для нахождения границ множества D_2 нужно решить задачу

$$\sum_{i=1}^{m} \gamma_i \to \min_{s_1^* \ge \hat{s}^2 \ge 0, t_1^* \ge \hat{t}^2 \ge 0, \gamma_i \in \{0,1\}} \quad (7)$$

при ограничениях

$$(1-\gamma_i)\hat{s}_i \le \hat{s}^2, i = \overline{1,m}, \quad (8)$$

$$(1-\gamma_i)\hat{t}_i \le \hat{t}^2, i = \overline{1,m}, \quad (9)$$

$$(210000 - \hat{s}^2)(1095 - \hat{t}^2) \ge s^2. \quad (10)$$

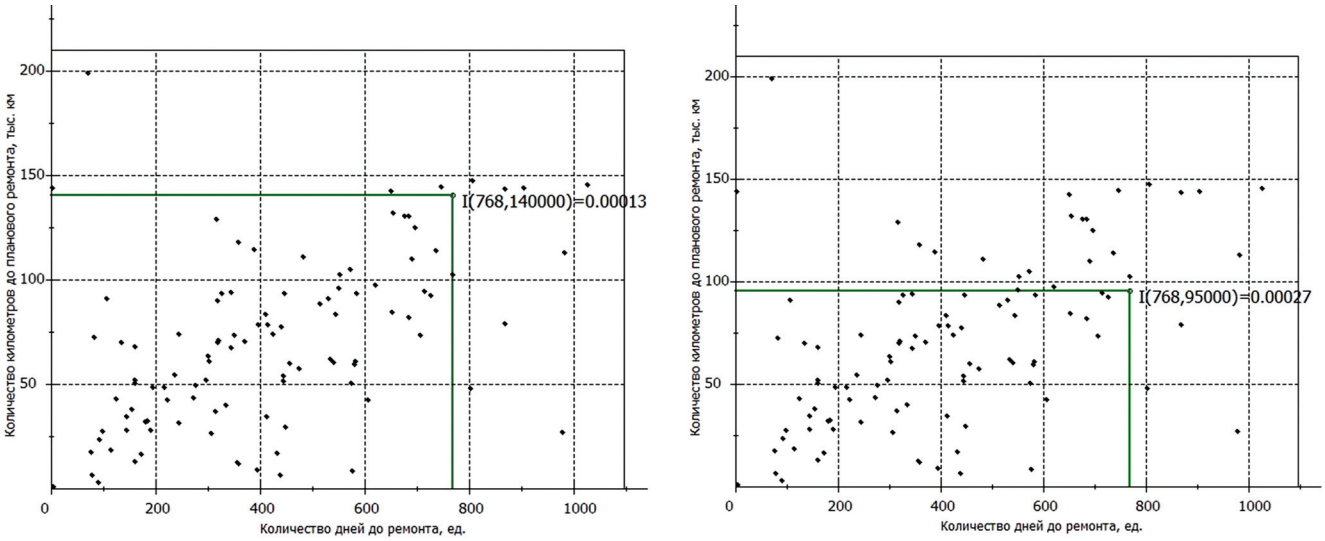


Рисунок 2 – Значения индекса опасности $I(\hat{s},\hat{t})$ при N=100000.

Пусть s_2^* и t_2^* – точки, задающие границу множества D_2, полученные при решении задачи (7) при ограничениях (8)-(10). Для нахождения границы множества D_3 нужно решить задачу

$$\sum_{i=1}^{m} æ_i \to \min_{s_2^* \ge \hat{s}^3 \ge 0, t_2^* \ge \hat{t}^3 \ge 0, æ_i \in \{0,1\}} \quad (11)$$

при ограничениях

$$(1-æ_i)\hat{s}_i \le \hat{s}^3, i=\overline{1,m}, \quad (12)$$

$$(1-æ_i)\hat{t}_i \le \hat{t}^3, i=\overline{1,m}, \quad (13)$$

$$(210000-\hat{s}^3)(1095-\hat{t}^3) \ge s^3. \quad (14)$$

Пусть t_3^*, s_3^* – решение задачи (11) при ограничениях (12)-(14).

Задача(4) при ограничениях (3), (5)-(6), задача (7) при ограничениях (8)-(10), задача (11) при ограничениях (12)-(14) являются задачами смешанного целочисленного программирования с квадратичными ограничениями и могут быть решены при помощи пакета Opti Toolbox в среде Matlab. Отметим, что для поиска границ множеств D_j можно руководствоваться не площадью соответствующих множеств, а, например, длиной одной из границ этого множества.

Таблица 1. Данные о количестве километров до ремонта

Кол-во км до рем.	143548	665	198865	17278	6051	72373	2501	23317	27410	90631	18460	42994
Кол-во дней до рем.	2	4	71	77	79	83	90	92	98	106	114	125
Кол-во км до рем.	69673	34066	27656	37715	50458	67534	12714	51974	16367	31546	32384	27573
Кол-во дней до рем.	135	144	144	154	160	160	161	161	172	180	184	191
Кол-во км до рем.	48288	48072	42490	54148	31241	73995	43001	49288	51872	63043	60743	26186
Кол-во дней до рем.	195	216	222	236	245	245	272	276	297	300	303	306
Кол-во км до рем.	36612	128533	69670	89674	70884	93159	93423	39596	93873	67490	73325	12043
Кол-во дней до рем.	314	317	318	318	320	327	327	335	344	345	351	356
Кол-во км до рем.	117655	11877	70430	114233	8977	78327	83145	34292	78273	73877	16865	6496
Кол-во дней до рем.	358	359	370	389	394	396	410	412	414	425	432	438
Кол-во км до рем.	77204	51497	53710	93079	29083	59903	57380	110608	88367	90629	61746	60260
Кол-во дней до рем.	441	444	445	447	449	456	475	483	515	530	535	541
Кол-во км до рем.	83401	95796	102241	104506	50167	8145	59087	60796	93256	42433	97020	142347
Кол-во дней до рем.	545	551	553	573	574	577	581	583	585	606	620	650
Кол-во км до рем.	84005	131848	130384	81517	130416	109896	124811	73301	94070	92140	113741	144321
Кол-во дней до рем.	652	654	676	684	685	691	697	707	715	726	736	747
Кол-во км до рем.	102477	47759	147077	78562	143361	143654	26937	112502	145128			
Кол-во дней до рем.	768	803	806	869	869	904	979	983	1026			

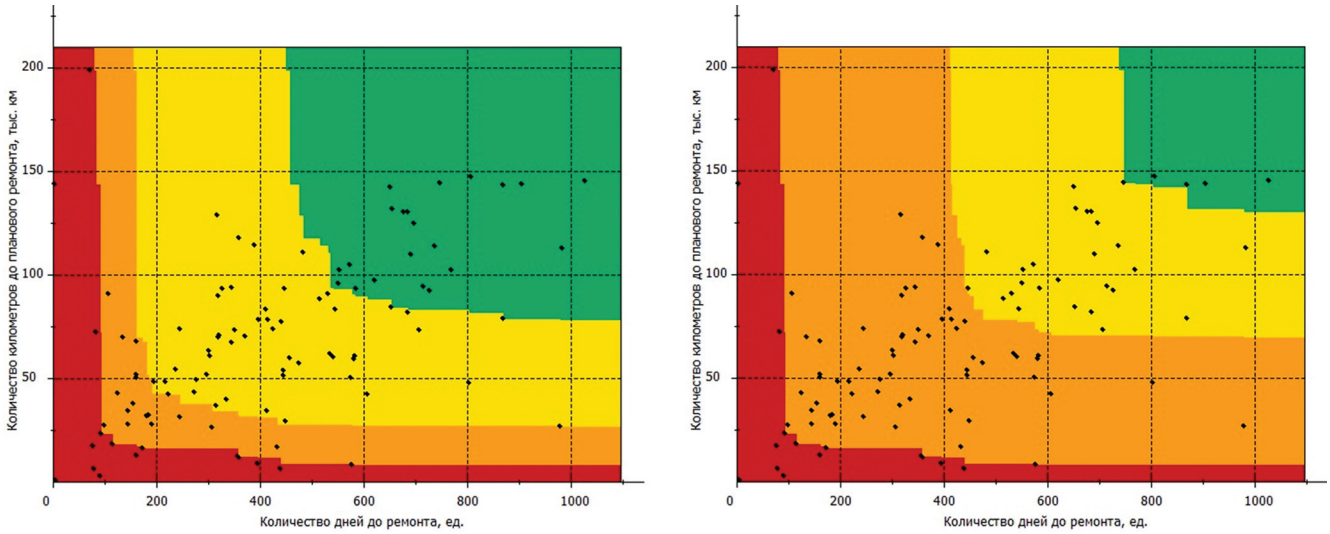


Рисунок 3 – Диаграмма (не)допустимых значений факторов при i_1=0,0004, i_2=0,0009, i_3=0,001 (слева) и i_1=0,0001, i_2=0,0005, i_3=0,001 (справа)

Пример

Пусть по итогам некоторого года зафиксировано 105 случаев, когда был обнаружен дефект в боковой раме, а N=100000. В таблице 1 приведем данные о количестве дней до планового ремонта и количестве километров до планового ремонта в этих случаях.

На основе представленных в табл. 1 данных построим значения индекса опасности в некоторых точках плоскости $\hat{t}O\hat{s}$ (рис. 2).

Теперь построим зоны (не)допустимых значений факторов для различных значений параметров i_1, i_2, i_3 (рис. 3).

Как следует из рис. 3, изменение значений параметров i_1, i_2, i_3 существенно влияет на зоны (не)допустимых значений факторов излома боковой рамы.

Задав $s_1 = 5 \cdot 10^7$, $s_2 = 1,25 \cdot 10^8$, $s_3 = 1,75 \cdot 10^8$, получаем $t_1^* = 620,27$, $s_1^* = 104561,9$, $t_2^* = 297$, $s_2^* = 51974$, $t_3^* = 114$, $s_3^* = 27410$ и следующую зону (не)допустимых значений факторов, влияющих на излом боковой рамы (рис. 4).

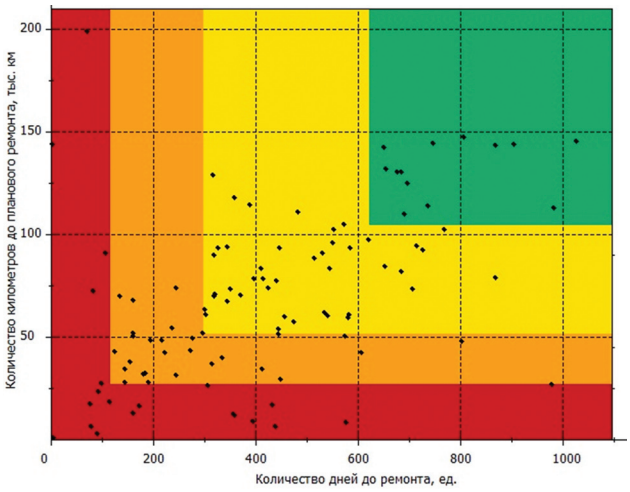


Рисунок 4 – Диаграмма (не)допустимых значений факторов, построенная на основе решения задач оптимизации

Заключение

В настоящей работе была рассмотрена задача по определению зон (не)допустимых значений факторов, влияющих на излом боковой рамы тележки вагона грузового поезда. Для этой цели был построен индекс опасности, зависящий от количества дней и километров до следующего планового деповского/капитального ремонта. На основе этого индекса были предложены две методики определения зон (не)допустимых значений факторов. Первая целиком основывалась на значениях индекса опасности. Поскольку абсолютное значение индекса опасности не является прямой оценкой вероятности излома боковой рамы, была предложена вторая методика, в которой фиксировалась площадь определенной зоны (не)допустимых значений и среди всех множеств одинаковой площади выбиралось такое, у которого значение максимума индекса опасности на нем было бы наименьшим.

Библиографический список

1. **ГОСТ 33433-2015.** Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте [Текст]. – Введ. 2016–09–01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 39 с.

2. **Новожилов Е.О.** Принципы построения матрицы рисков [Текст] / Е.О. Новожилов // Надежность. – 2015. – № 3. – С. 73-86.

3. **Liu X.** Analysis of U.S. freight-train derailment severity using zero-truncated negative binomial regression and quantile regression [Text] /X. Liu, M.R. Saat, X. Qin, C.P.L. Barkan // Accident Analysis and Prevention. – 2013. – Vol. 59. – P. 87-93.

4. **Bagheri M.** Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist [Text] / M. Bagheri, F. Saccomanno, S. Chenouri, L.P. Fu // Accident Analysis and Prevention. – 2011. – Vol. 43. – P. 613–620.

5. **Замышляев А.М.** Построение функциональной зависимости между рядом распределения количества вагонов в сходе и различными факторами движения [Текст] / А.М. Замышляев, А.Н. Игнатов, А.И. Кибзун, Е.О. Новожилов // Надежность. 2018. №1. С. 53-60.

6. **Anderson R.T.** Derailment probability analysis and modeling of mainline freight trains [Text] / R.T. Anderson, C.P.L. Barkan // Proceedings of the 8th International Heavy Haul Conference, International Heavy Haul Association, Rio de Janeiro. – 2005. – P. 491-497.

7. **Schafer D.H.** Effect of Train Length on Railroad Accidents and a Quantitative Analysis of Factors Affecting Broken Rails. MS thesis [Text] / D.H. Schafer. – University of Illinois at Urbana–Champaign, 2006.

8. **Замышляев А.М.** Статистическая оценка опасности возникновения происшествий на железнодорожномтранспорте [Текст] / А.М. Замышляев, Ю.С. Кан, А.И. Кибзун, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2012. – № 2. – С. 104-117.

9. **Лукин В.В.** Расчет боковой рамы и надрессорной балки тележки грузового вагона методом конечных элементов [Текст] / В.В. Лукин, А.О. Бельский // Известия Транссиба. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 7-12.

10. **Галиев И.И.** Причины нарушения безопасности движения грузовых вагонов в эксплуатации [Текст] / И.И. Галиев и др. // Известия Транссиба. – 2013. – Т. 15. – № 3. – С. 133-141.

11. **Kim J.S.** Durability evaluation of a composite bogie frame with bow-shaped side beams [Text] / J.S. Kim, K.B. Shin, H.J. Yoon, W.G. Lee // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2012. – Vol. 26. – No. 2. – P. 531 536.

12. Методика отнесения грузовых вагонов к категории со сниженным уровнем эксплуатационной безопасности по показателям надежности и функциональной безопасности литых деталей тележек (рам боковых). Согласовано Комиссией Совета по железнодорожному транспорту по вопросам безопасности движения на железнодорожном транспорте. Протокол № 1 от «6-7» июня 2013 года. Согласовано Комиссией Совета по железнодорожному транспорту полномочных специалистов вагонного хозяйства железнодорожных администраций. Протокол № 55 от «19-21» февраля 2013 года.

13. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении. Утверждено протоколом пятьдесят седьмого заседания Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества 16-17 октября 2012 г.

14. **Кибзун А.И.** Методика организации профилактики транспортного происшествия [Текст] / А.И. Кибзун, А.Н. Игнатов // Труды второй научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте ИСУЖТ-2013». – 2013. – С. 177-179.

Сведения об авторах

Игорь Б. Шубинский – доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя НТК АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, тел. +7 (495) 786-68-57, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

Алексей М. Замышляев – доктор технических наук, заместитель Генерального директора АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: A.Zamyshlaev@vniias.ru

Алексей Н. Игнатов – кандидат физико-математических наук, Московский Авиационный институт, Москва, Российская Федерация, тел. +7 (906) 059 50 00, e-mail: alexei.ignatov1@gmail.com

Андрей И. Кибзун – доктор физико-математических наук, профессор, Московский Авиационный институт, заведующий кафедрой, Москва, Российская Федерация, тел. +7 (499) 158-45-60, e-mail: kibzun@mail.ru

Евгений О. Новожилов – кандидат технических наук, начальник отдела АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: eo.novozhilov@vniias.ru

Поступила: 22.02.2019