

УДК 656.216.2

**Попов А. Н., канд. техн. наук
Гришаев С. Ю.**

*Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург*

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ ОСТАНОВКЕ АВТОМОБИЛЯ НА ПЕРЕЕЗДЕ

Аннотация. Интерес к проблеме разграничения потоков автомобильного и железнодорожного транспорта на переездах обусловлен повышенным риском транспортных происшествий и необходимостью ждать открытия переезда для автомобилей при проследовании поезда и связанных с этим ожиданием потерями. Со временем острота проблемы только нарастает – машин становится все больше, интенсивность и скорость движения увеличиваются, как и вес поездов. Наиболее эффективное средство для разграничения транспортных потоков на переездах – их разделение на разных уровнях за счет строительства эстакад. Существенным недостатком строительства эстакад, не позволяющим полностью решить задачу в приемлемые сроки, являются высокие капитальные затраты на строительство. Поэтому для большинства переездов, расположенных в одном уровне, основным средством управления транспортными потоками остается автоматическая переездная сигнализация (АПС), принципы действия которой остались практически без изменений с середины прошлого века, а условия ее работы существенно ухудшились.

По существующей методике расчета И-276-00 время извещения о приближении поезда определяется в зависимости от максимальной скорости движения поездов по переезду и количества железнодорожных путей, через которые проходит автомобильная дорога, а характеристики поезда и длина пути его торможения не учитываются. Ранее проведенные исследования показали, что при минимальной ширине переезда, установленной существующей методикой, остановка грузовых поездов перед переездом после его закрытия гарантируется только для скоростей движения не более 30 км/ч, остановка пассажирских поездов – не более 60 км/ч. При более высоких скоростях движения тормозного пути может не хватить, что приведет к столкновению в случае вынужденной остановки автотранспорта на переезде. Поезда, следующие через переезд, имеют различные характеристики: скорость движения и тормозной коэффициент. Поэтому требуется выполнить оценку вероятности столкновения при вынужденной остановке автотранспорта на переезде.

В работе исследована ситуация возникновения поломки автомобиля на железнодорожном переезде. По данным, полученным от бортовых комплексов локомотива, построены гистограммы распределений скорости и действительного тормозного коэффициента поездов, приближающихся к переезду. На основе статистических данных подтверждена гипотеза подчинения действительного тормозного коэффициента поездов теоретическому распределению Коши. Предложена статистическая модель распределения скорости поездов при приближении к переезду.

Дан метод оценки вероятности столкновения с поездом при поломке автомобиля на переезде. Получено численное значение оценки вероятности столкновения по методу, изложенному в работе. Обоснована необходимость разработки системы управления АПС по характеристикам приближающегося поезда.

Железнодорожный переезд, автоматическая переездная сигнализация, участок извещения, тормозной путь, время извещения, бортовые локомотивные комплексы

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-21-38

Введение

Основное средство безопасного разграничения транспортных потоков на железнодорожных переездах — автоматическая переездная сигнализация. Закрывание переезда осуществляется под воздействием колес поезда на участок извещения — граничащую с переездом рельсовую цепь. Замыкание рельсовой цепи колесами поезда приводит после некоторой выдержки времени к срабатыванию устройств автоматической переездной сигнализации, которая управляет состоянием переезда. Закрывание переезда ведет к остановке потока автотранспорта через него.

На железных дорогах РФ время извещения о приближении поезда определяется в зависимости от максимальной скорости движения поездов по переезду и количества железнодорожных путей, через которые проходит автомобильная дорога. В зарубежных странах дополнительно учитываются и другие факторы, например типы транспортных средств, использующих переезд [1].

Большим количеством аварий и тяжестью их последствий обусловлено обилие предложений по совершенствованию АПС и повышению безопасности на переездах. В их числе:

- автоматический контроль свободности переезда от автотранспорта и замена дежурного по переезду на удаленного оператора [2–4];
- организация дополнительных участков извещения или замена существующих решениями, основанными на счете осей [5–7];
- оповещение машинистов локомотива и водителей автотранспортных средств о ситуации на переездах [8, 9];
- уменьшение времени закрытого состояния переезда за счет управления закрытием в зависимости от координаты и скорости поезда, определенных по параметрам рельсовых цепей [10–14].

Устройство и отличия АПС для участков высокоскоростного и смешанного движения поездов рассмотрены в работах [15, 16].

Вопросам анализа безопасности переездов и принятия решений посвящены работы [17–27].

В опубликованных источниках не рассматриваются вопросы столкновений при вынужденной остановке автотранспорта в зоне переезда. Впервые задача исследования ситуаций поломки автотранспорта на железнодорожном переезде была сформулирована в работе [28].

Событие, заключающееся в остановке транспортного средства на переезде и невозможности его покинуть, имеет вероятность, которой нельзя пренебрегать. Такое случается регулярно и приводит к аварийным ситуациям (столкновениям). Однако в существующих технических средствах управления переездом и в алгоритмах их функционирования вероятность отказа автомобиля на переезде не учитывается. При обнаружении препятствия на переезде машинист начинает остановку поезда, применяя экстренное торможение. Если тормозной

путь поезда превышает оставшееся до переезда расстояние, происходит столкновение. Поэтому при управлении АПС необходимо учитывать тормозные пути поездов.

Поезда, следующие через переезд, имеют различные характеристики, от которых зависит длина тормозного пути: скорость движения и тормозной коэффициент. Длина участка извещения АПС фиксирована для каждого переезда. Столкновение возможно, когда тормозной путь поезда превышает длину участка извещения. Требуется выполнить оценку вероятности столкновения при вынужденной остановке автотранспорта на переезде, что позволит определить необходимость совершенствования алгоритма работы АПС и выяснить очередность применения измененных алгоритмов для конкретных переездов.

1. Параметры поездов, следующих через переезд

Уравнение движения поезда, следующего через переезд, определяется известным выражением:

$$\frac{dv}{dt}(1 + \gamma) = f_T - w(v) - w(i) - \vartheta_p \varphi_{kp}(v), \quad (1)$$

где γ — коэффициент инерции вращающихся масс; f_T — удельная сила тяги локомотива; $\varphi_{kp}(v)$ — расчетный коэффициент трения тормозной колодки о бандаж; ϑ_p — расчетный тормозной коэффициент; $w(v)$ — удельная основная сила сопротивления движению; $w(i)$ — удельная сила сопротивления движению от уклонов и кривых.

Выражение для определения тормозного пути поезда находим из уравнения движения. В случае вынужденной остановки на переезде автотранспортного средства тормозной путь поезда можно рассматривать как случайную величину S_T с плотностью распределения $f(S_T)$, которая зависит от параметров самого поезда. Получить значения тормозных путей поездов на каждом переезде экспериментальным путем не представляется возможным. Поэтому предлагается определить тормозные пути по известной модели торможения поезда, подставляя в нее значения экспериментально измеренных параметров движения поезда на переезде. Тормозной путь поезда связан с его параметрами известной функциональной зависимостью (1) при выключенной тяге локомотива:

$$S_T = \frac{1}{\zeta} \int_0^{v_H} \frac{v dv}{\vartheta_p \varphi_{kp}(v) + w(v) + w(s)}.$$

Тогда случайная величина S_T может быть оценена как функция случайных аргументов от начальной скорости торможения v_H и действительного тормозного коэффициента ϑ_d :

$$\widehat{S}_T = \varphi(v_n, \vartheta_d). \quad (2)$$

Значения действительного тормозного коэффициента измеряются локомотивной аппаратурой САУТ, БЛОК и БЛОК-М, которая также позволяет узнать фактическое значение скорости в требуемых точках пути. Измеренные значения сохраняются в автоматизированной системе АСУТ-НБД2.

Для четырех переездов, расположенных на сети Свердловской железной дороги, по данным средств сбора и хранения регистраторов параметров движения АСУТ-НБД2 и системы передачи данных СВЛТР, имеется выборка скоростей движения при пересечении подвижным составом переезда и выборка действительных тормозных коэффициентов этих поездов. Получена выборка значений действительного тормозного коэффициента объемом 314 записей регистраторов параметров движения САУТ-ЦМ/485, САУТ-К, БЛОК и БЛОК-М за май 2020 года.

Расчетный тормозной коэффициент, характеризующий средства торможения поезда, представляет собой отношение суммы сил нажатия тормозных колодок ΣK к весу поезда (сумме веса локомотива P и веса вагонов P):

$$\vartheta_p = \frac{\Sigma K}{(Q + P)}. \quad (3)$$

Средства торможения поезда должны обеспечивать безопасность при остановке на любой допустимой скорости движения. Считается, что для обеспечения безопасности расчетный тормозной коэффициент грузовых поездов и скоростей движения до 90 км/ч должен быть не менее 3,3, пассажирских со скоростями до 120 км/ч — не менее 6 [29, 30].

Значения действительного тормозного коэффициента, определенного по результатам поездок поездов, в отличие от расчетного будут иметь разброс, который обусловлен невозможностью точного определения силы нажатия всех тормозных колодок и веса всех вагонов при формировании поезда в условиях эксплуатации [31].

Определим закон распределения действительного тормозного коэффициента, что требует выполнения следующих этапов:

- выбора теоретического закона распределения;
- оценки параметров распределения по экспериментальным данным;
- вычисления теоретических значений частот и сравнения их с выборочными;
- анализа значения статистики χ^2 и вывода о согласии экспериментальных данных с теоретическим законом распределения.

В литературе [31, 32] теоретически получено и обосновано выражение для определения плотности распределения фактических значений тормозного коэффициента:

$$p(\vartheta_{\text{сл}}) = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\vartheta_{\text{сл}}}{a}\right)^2} \cdot \frac{B}{A} e^{\frac{B^2}{A} - C}, \quad (4)$$

где $\vartheta_{\text{сл}}$ — случайное значение тормозного коэффициента, возможное в рассматриваемых условиях; a, A, B, C — параметры, зависящие от средних значений случайной силы нажатия тормозов и случайного веса поезда, а также от их дисперсий.

По выражению (4) можно предположить, что плотность распределения тормозного коэффициента подчиняется закону Коши. Верность данного предположения подтверждается тем, что отношение независимых нормально распределенных случайных величин (в данном случае это сумма сил нажатий тормозных колодок и вес поезда) распределено по закону Коши [33–35].

Случайная величина, подчиняющаяся закону Коши, имеет плотность распределения:

$$p(\vartheta_{\text{д}}) = \frac{1}{\sqrt{\pi b}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{(\vartheta_{\text{д}} - a)}{b}\right)^2}, \quad (5)$$

где a — параметр положения; b — параметр масштаба, характеризующий центр распределения.

Распределение Коши не имеет моментов вследствие расходимости определяющих их интегралов, относится к классу распределений с тяжелыми хвостами — распределений, для которых не выполнен закон больших чисел. Это означает, что существуют выборочные оценки для среднего значения и среднего квадратического отклонения, однако они ни к чему не сходятся и не имеют функциональной связи с параметрами распределения.

Оценка параметров на основе экспериментальных данных представляет трудности.

Наиболее точные оценки можно получить методом максимального правдоподобия и поисковыми алгоритмами [36.]. Для получения оценок указанным методом целесообразно использовать компьютерные программы

По имеющейся выборке значений действительного тормозного коэффициента получены оценки: $\hat{a} = 3,3$, $\hat{b} = 0,14$.

Проверим гипотезу о том, что распределение значений действительного тормозного коэффициента подчиняется закону Коши, с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 . По формуле Стерджесса оптимальное количество интервалов группировки данных равно 9. Сведем в таблицу 1 статистический ряд, построенный по выборочным значениям.

Таблица 1. Статистический ряд распределения тормозного коэффициента

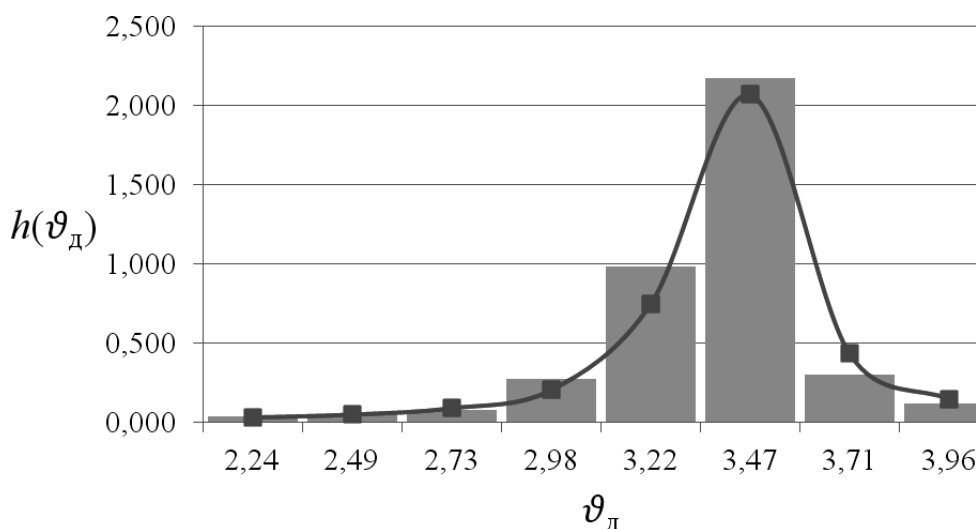
$\vartheta_{д_i}$	2,12	2,37	2,61	2,86	3,1	3,34	3,59	3,83	4,08
ω_i	0,01	0,013	0,019	0,067	0,24	0,53	0,073	0,029	0,019
h_i	0,039	0,052	0,078	0,274	0,980	2,170	0,301	0,118	0,078
$p(\vartheta_{д_i})$	0,032	0,050	0,090	0,205	0,784	2,067	0,433	0,147	0,071

$\vartheta_{д_i}$ — середины частотных интервалов; ω_i — относительные частоты; h_i — плотность относительных частот; $p(\vartheta_{д_i})$ — значения плотности теоретического распределения в серединах частотных интервалов.

Наблюдаемое значение статистики $\chi^2_{\text{набл}} = 11,5$. Критическое значение статистики $\chi^2_{\text{критич}} = 15,5$ на уровне значимости 0,05 и числа степеней свободы гипотеза о подчинении выборочных значений действительного тормозного коэффициента не отвергается.

Гистограмма распределения действительного тормозного коэффициента и закон распределения Коши приведены на рисунке 1.

Скорость движения поезда определяется принимаемыми кодовыми комбинациями локомотивной сигнализации: «З» разрешает движение с максимальной установленной на участке скоростью, «Ж» разрешает движение поезда со скоростью не более 60 км/ч, «КЖ» требует выполнить остановку перед следующим напольным светофором. Машинист стремится вести поезд со скоростью, близкой к наибольшей разрешенной для текущей кодовой комбинации. Поэтому можно предположить полимодальное распределение плотности вероятности

**Рис. 1.** Гистограмма плотности распределения действительного тормозного коэффициента и теоретической плотности распределения

скорости поезда на переезде с количеством мод равным трем — по числу кодовых комбинаций. Каждая из мод подчиняется нормальному закону:

$$p(v_H) = \frac{P(З)}{\sigma_З \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v_З - m_З)^2}{2\sigma_З^2}} + \frac{P(Ж)}{\sigma_Ж \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v_Ж - m_Ж)^2}{2\sigma_Ж^2}} + \frac{P(КЖ)}{\sigma_{КЖ} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v_{КЖ} - m_{КЖ})^2}{2\sigma_{КЖ}^2}}, \quad (6)$$

где $P(З)$, $P(Ж)$, $P(КЖ)$ — вероятности приема кодов «З», «Ж» и «КЖ» соответственно.

Модель вероятностной смеси в соответствии с (6) представлена на рисунке 2.

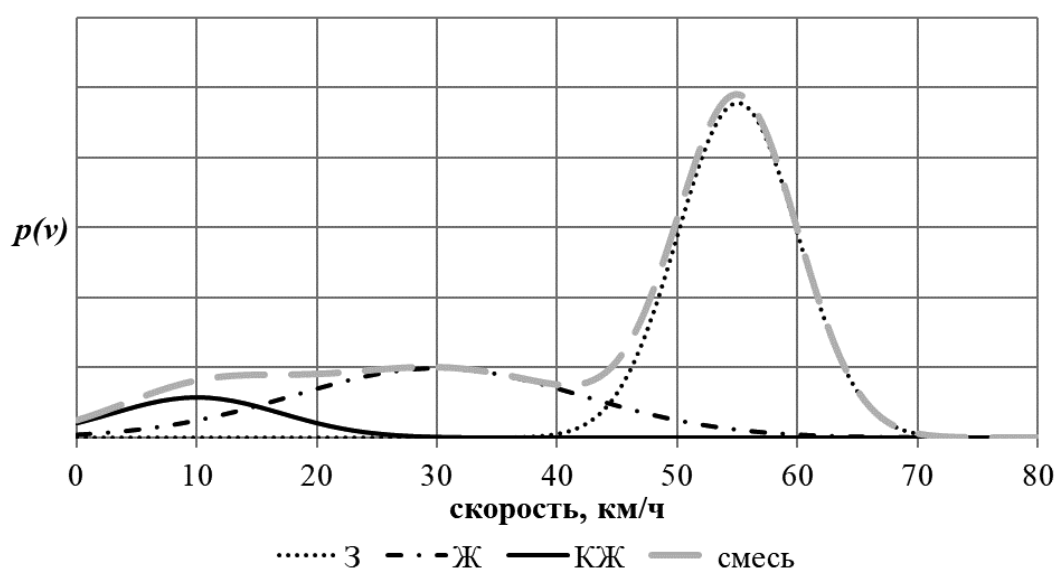


Рис. 2. Модель вероятностной смеси распределения скоростей

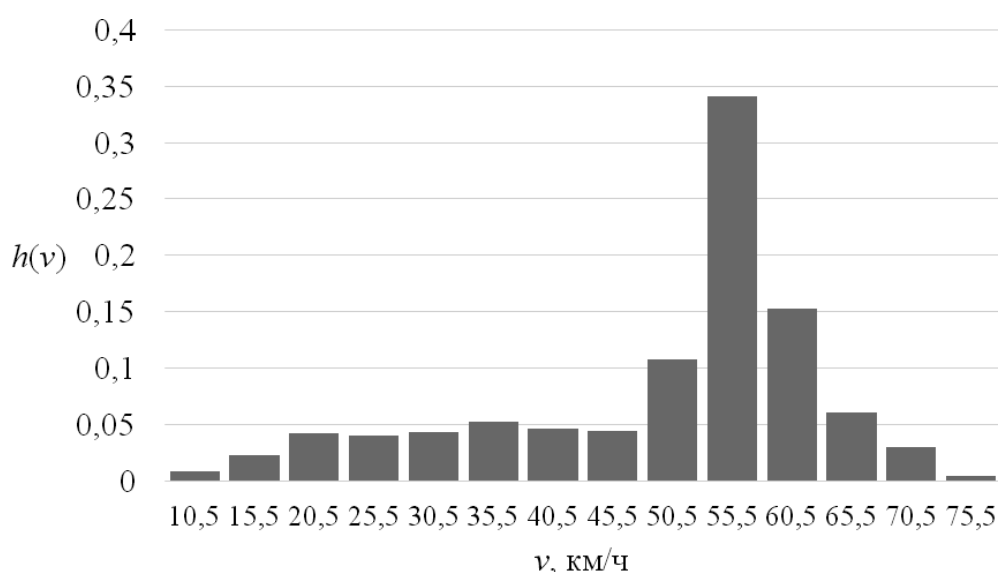


Рис. 3. Гистограмма распределения скорости поездов перед переездом

Вид гистограммы распределения скоростей, построенной по выборочным значениям (рис. 3), соответствует предполагаемому в (6).

На рассматриваемых переездах 90 % поездов движется со скоростями до 65 км/ч. При этом участки извещения рассчитаны на скорости более 100 км/ч.

2. Определение вероятности столкновения на переезде при поломке автомобиля

Решим задачу нахождения вероятности безаварийной остановки поезда перед переездом по известным выборкам значений скорости и тормозных коэффициентов. Для этого требуется разработать соответствующий метод.

Обозначим $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_N\}$ – выборку из N элементов скоростей поездов перед переездом, а $\theta = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_j, \dots, \vartheta_M\}$ – выборку из M элементов значений тормозного коэффициента.

Для каждой пары выборочных значений (v_i, ϑ_j) вычислим:

$$s_{ij} = \frac{1}{\zeta} \int_0^{v_i} \frac{v dv}{\vartheta_j \varphi(v) + w(v)}. \quad (7)$$

Для определения S_{ij} используются численные методы: интервалов времени и интервалов скорости [29, 30].

Наиболее распространенным при практическом использовании является аналитический метод расчета длины тормозного пути, опирающийся на численное интегрирование уравнения движения поезда по интервалам скорости. Тормозной путь разбивается на два участка: подготовительный $S_{\text{тп}}$ и действительный $S_{\text{тд}}$. Считается, что при прохождении $S_{\text{тп}}$ тормоза не работают, а на участке $S_{\text{тд}}$ они действуют с максимальным и неизменным давлением в тормозных цилиндрах (ТЦ), возникающим скачкообразно. Расчет длины тормозного пути по интервалам скорости выполняется по формуле:

$$S_{\text{т}} = S_{\text{тп}} + S_{\text{тд}} = \frac{v_0 t_n}{3,6} + \sum \frac{500(v_{\text{н}}^2 - v_{\text{к}}^2)}{[w_{\text{ox}} + w_{\text{с}} + 1000\vartheta_p \varphi_{\text{кр}}]},$$

где $v_{\text{н}}$ – начальное значение скорости; $v_{\text{к}}$ – значение, до которого следует снизить скорость; w_{ox} – основное удельное сопротивление движению поезда при холостом ходе локомотива; $w_{\text{с}} = 9,81i$ – дополнительное удельное сопротивление движению от спрямленного профиля и плана; i – уклон; $\varphi_{\text{кр}}$ – коэффициент трения колодок; ϑ_p – тормозной коэффициент поезда.

В связи с заменой реальной диаграммы наполнения ТЦ на скачкообразную метод интервалов скорости дает удовлетворительную точность расчетов при скоростях до 40 км/ч и на спусках до 20 ‰. Если остановка поезда происходит

до наполнения ТЦ, то замена диаграммы приводит к ошибке, заключающейся в увеличении тормозного пути.

Метод интегрирования уравнения движения поезда по интервалам времени более точен и универсален. В нем изменение скорости Δv в интервале Δt определяется по формуле:

$$\Delta v = -\frac{\zeta}{3600}(w_{\text{ок}} + w_{\text{с}} + 1000g_{\text{р}}\phi_{\text{кр}})\Delta t.$$

Зная скорость движения на предыдущем расчетном шаге $v_{\text{п}}$ и получив среднюю, находят приращение длины тормозного пути $\Delta S_{\text{т}}$ в интервале Δt :

$$\Delta S_{\text{т}} = \frac{v_{\text{п}} + \Delta v}{2} \cdot \frac{\Delta t}{3,6}.$$

Полученные таким образом отрезки $\Delta S_{\text{т}}$ суммируются для определения полного тормозного пути.

Выполнять остановку поезда перед еще не закрытым переездом не имеет смысла. Торможение следует осуществлять только после полного закрытия переезда, когда наблюдается вынужденная остановка автотранспорта и невозможность его перемещения. В расчетной модели необходимо уменьшить длину участка извещения на расстояние, которое проходит поезд за время закрытия переезда. Поскольку время закрытия переезда — величина постоянная, составляет 15 с, расстояние, проходимое поездом за это время, будет зависеть от скорости поезда. Поэтому целесообразно увеличить тормозной путь поезда на расстояние, которое он пройдет за время закрытия переезда.

Кроме того, требуется учитывать расстояние, проходимое поездом за время реакции машиниста на возникшую на переезде ситуацию $t_{\text{реак}}$.

С учетом приведенных выше замечаний определим значения k_{ij} , показывающие, во сколько раз тормозной путь поезда (с учетом времени на закрытие переезда) превышает длину участка извещения:

$$k_{ij} = \frac{1}{L_{\text{изв}}} \left[s_{ij} + \frac{v_i(t_{\text{закр}} + t_{\text{реак}})}{3,6} \right]. \quad (8)$$

По полученным значениям k_{ij} построим гистограмму $h(k_{ij})$, которая является оценкой плотности распределения вероятностей $f(K)$. Гистограмма представлена на рисунке 4.

Вероятность безаварийной остановки поезда перед переездом, занятым автотранспортом, можно определить по выражению:

$$P_{\text{ба}} = \int_{-\infty}^1 f(K)dk, \quad (9)$$

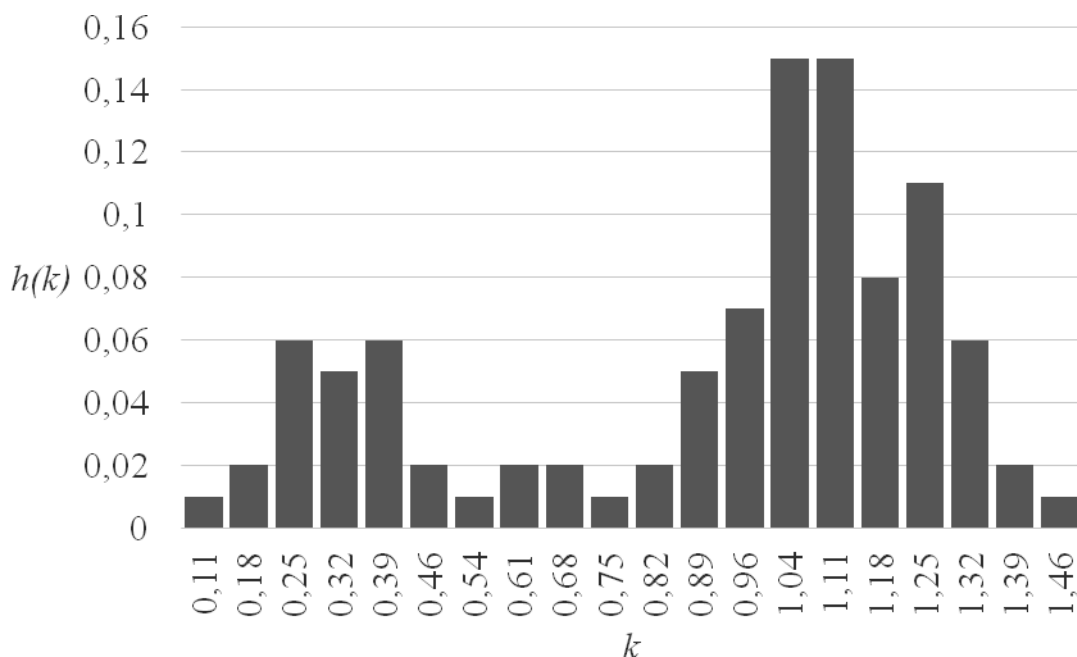


Рис. 4. Гистограмма распределения тормозного пути, нормированная к длине участка извещения

ее оценка может быть получена суммированием k_{ij} , со значениями меньше 1:

$$\widehat{P_{\text{ба}}} = \frac{\sum_i \sum_j k_{ij}}{ij}, k_{ij} < 1. \quad (10)$$

а вероятность столкновения поезда с вынужденно остановившимся транспортным средством на переезде будет определяться формулой:

$$P_c = 1 - P_{\text{ба}}. \quad (11)$$

Вычисления по предложенному методу показывают, что вероятность безаварийной остановки, рассчитанная в соответствии с (9), по имеющимся выборкам составляет $P_{\text{ба}} = 0,42$, а вероятность столкновения $P_c = 0,58$. Необходимо отметить, что при вычислении вероятностей не учитывалось время реакции машиниста. Было принято, что машинист применяет торможение сразу после поломки автомобиля на переезде.

Для решения проблемы предлагается реализовать систему управления переездной сигнализацией по характеристикам приближающегося поезда, что позволит обеспечить остановку поезда в случае поломки автотранспорта на переезде. Остановка поезда торможением выполняется только при условии занятости закрытого переезда автотранспортом или неисправности переездной сигнализации. В случае штатной работы АПС поезд проследует переезд без снижения скорости. Это дает основания полагать, что предлагаемая система

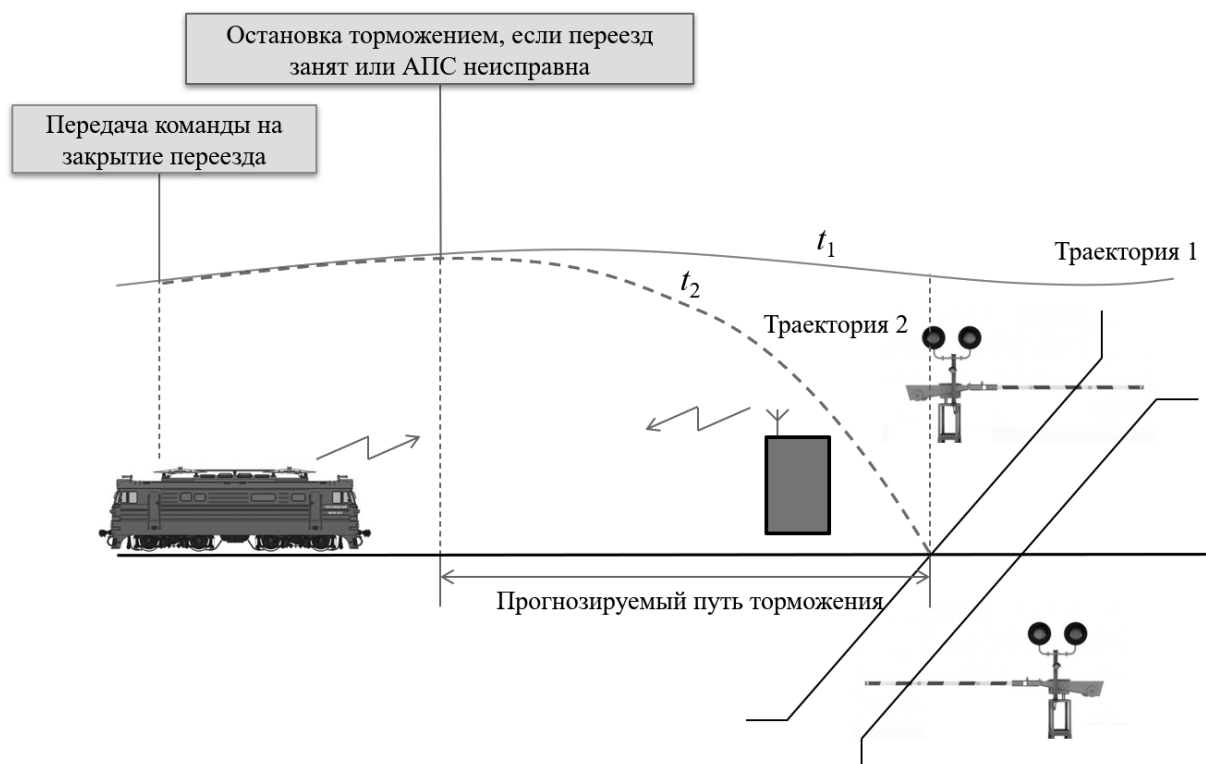


Рис. 5. Траектории приближения поезда к переезду

не увеличит время простоя автотранспорта у закрытого переезда. Приближение поезда к переезду может осуществляться по двум траекториям (рис. 5).

Поезд проследует свободный от автотранспорта переезд по траектории 1 за время t_1 . Остановка поезда по траектории 2 выполняется за время t_2 только при условии, что автотранспорт не смог покинуть переезд после опускания шлагбаумов. Очевидно, что время t_2 будет превышать t_1 , но движение поезда по траектории 1 через переезд будет выполняться гораздо чаще, чем остановка перед переездом по траектории 2. Поэтому расчет времени извещения целесообразно вести используя значение времени t_1 .

Столкновения, допускаемые на оборудованных традиционной системой АПС переездах, зачастую приводят к длительному перерыву в движении поездов. Остановка поезда по траектории 2 перед занятым переездом без столкновения (несмотря на увеличение времени проследования переезда в сравнении с движением по траектории 1) окажет меньшее влияние на пропускную способность железной дороги, чем существующие системы АПС.

Заключение

Решение существующей проблемы столкновений поездов с вынужденно остановившимся на переезде автотранспортом позволит сделать переезды

безопаснее. Однако исследователи уделяют этому вопросу слишком мало внимания. Проблема связана с превышением тормозных путей поездов над длиной участков извещения переездов. Получить значения тормозных путей поездов на каждом переезде экспериментальным путем не представляется возможным. Поэтому предлагается определить тормозные пути по известной модели торможения поезда, подставляя в нее значения экспериментально измеренных параметров движения поезда на переезде.

Статистические исследования данных, полученных от локомотивных бортовых комплексов, позволили подтвердить гипотезу о подчинении действительного тормозного коэффициента закону Коши. Предложена модель вероятностной смеси распределения скорости поездов при приближении к переезду, в соответствии с которой скорости имеют полимодальное распределение плотности вероятности с количеством мод равным трем — по числу кодовых комбинаций. Каждая из мод подчиняется нормальному закону.

Предложенный в работе метод позволил количественно оценить вероятность столкновения на переезде при вынужденной остановке автотранспорта. Для исследуемого переезда с участком извещения длиной 700 м вероятность столкновения составляет 0,58.

Вероятностью столкновения на переезде можно управлять, изменяя длину участка извещения. Зная распределения скорости и действительного тормозного коэффициента поездов, следующих через конкретный железнодорожный переезд, реально обеспечить вероятность столкновения любой малости, изменяя длину участка извещения.

Сделанные по результатам проведенной работы выводы свидетельствуют о целесообразности разработки и внедрения технических решений управления АПС по характеристикам приближающегося поезда.

В дальнейшем необходимо исследовать, как предлагаемый принцип работы АПС влияет на время простоя автотранспорта у закрытого шлагбаума, и сравнить с аналогичной характеристикой традиционных АПС.

Библиографический список

1. Larue G., Miska M., Qian G., Wullems C., Rodwell D., Chung E., Rakotonirainy A. Can road user delays at urban railway level crossings be reduced? Evaluation of potential treatments through traffic simulation. Case Studies on Transport Policy. – Volume 8. – Issue 3. – September 2020. – Pp. 860–869.
2. Гуревич В. Л., Щиголев С. А. Устройства заграждения на переездах без дежурного работника//Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 5. – С. 4–7.
3. Чеблаков В. А., Катаев М. Н. Новые системы переездной сигнализации//Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 7. – С. 5–7.
4. Долгий А. И., Хатламаджиян А. Е., Шаповалов В. В., Кучеренко П. А., Шапекин А. Е. Система автоматизированного удаленного управления переездами//Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 7. – С. 4–7.

5. Тильк И. Г. Применение устройств счета осей в переездной сигнализации//И. Г. Тильк, Б. С. Сергеев//Транспорт Урала. – 2006. – № 2 (9). – С. 37–41.
6. Щиголев С. А. Автоматическая переездная сигнализация на счетчиках осей/С. А. Щиголев, С. А. Татиевский//Автоматика, связь, информатика. – 2005. – № 12. – С. 57–58.
7. Тильк И. Г. Новые устройства автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2010. – 167 с.
8. Ефанов Д. В. Сервис прогнозирования временных параметров работы железнодорожного переезда/Д. В. Ефанов, Д. Г. Плотников, Г. В. Осадчий//Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 4 (77). – С. 31–36.
9. Ефанов Д. В. Комплексный учет параметров объектов инфраструктуры железной дороги, железнодорожного подвижного состава и автомобильного транспорта для обеспечения безопасности движения на переездах/Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, Д. Г. Плотников, В. В. Хорошев//Автоматика на транспорте. – 2018. – № 2. – Т. 4. – С. 167–194.
10. Герус В. Л. Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий/В. Л. Герус, Е. М. Тарасов, А. Е. Тарасова//Вестник Мордовского университета. – 2018. – № 2. – Т. 28. – С. 191–207.
11. Тарасов Е. М. Оценка эффективности существующей переездной сигнализации/Е. М. Тарасов, Д. В. Железнов, В. Л. Герус//Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 6 (54). – С. 58–61.
12. Масайтис Ю. Л. Переездной автоматический комплекс устройств/Ю. Л. Масайтис//Автоматика, связь, информатика. – 1997. – № 11. – С. 27.
13. Каменский В. Б. Организации безопасности движения на переездах – комплексную системную основу/В. Б. Каменский, Ю. А. Тюпкин, В. А. Поздняков//Железнодорожный транспорт. – 1999. – № 1. – С. 46–50.
14. Грачев Г. Н. Применение метода импульсного зондирования для организации переездной сигнализации/Г. Н. Грачев, М. Б. Гуменик//Автоматика, связь, информатика. – 1997. – № 11. – С. 28–30.
15. Никитин А. Б. Обеспечение безопасности на станционных переездах при организации высокоскоростного движения на действующих линиях/А. Б. Никитин, С. Т. Болтаев//Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб: ПГУПС, 2016. – № 2. – С. 206–214.
16. Кириллов А. Н. Модернизация схем автоматической переездной сигнализации//Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 9. – С. 30–31.
17. Система поддержки принятия решений в задачах обеспечения безопасности железнодорожного переезда: Монография/А. И. Годяев. – Хабаровск: ДВГУПС, 2004. – 92 с.
18. Годяев А. И. Безопасность на переездах и способы снижения аварийности//Мир транспорта. – 2004. – № 4 (8). – Т. 2. – С. 80–85.
19. Abioye O. F., Dulebenets M. A., Pasha J. et al. Accident and hazard prediction models for highway–rail grade crossings: a state-of-the-practice review for the USA. Rail. Eng. Science 28, 251–274 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00215-w>.
20. Chris De Gruyter & Graham Currie (2016) Rail-road crossing impacts: an international synthesis, Transport Reviews, 36:6, 793–815. DOI: 10.1080/01441647.2016.1188429.
21. Gitelman V., Hakkert A. S. The evaluation of road-rail crossing safety with limited accident statistics. Accident Analysis & Prevention. – Vol. 29. – Issue 2. – March 1997. – Pp. 171–179.
22. Borsos A., Gabor M., Koren C. (2016) Safety ranking of railway crossings in Hungary. Transp Res Procedia 14:2111–2120.
23. Liang C., Ghazel M., Cazier O. et al (2017) Risk analysis on level crossings using a causal Bayesian network based approach. Transp Res Procedia 25:2167–2181.

24. Davey J., Wallace A., Stenson N., Freeman J. The experiences and perceptions of heavy vehicle drivers and train drivers of dangers at railway level crossings. *Accident Analysis and Prevention*. – Vol. 40. – Issue 3. – May 2008. – Pp. 1217–1222.
25. Haleem K., Gan A. Contributing factors of crash injury severity at public highway-railroad grade crossings in the U. S. *Journal of Safety Research*. – Vol. 53. – 1 June 2015. – Pp. 23–29.
26. Larue G. S., Naweed A., Rodwell D. The road user, the pedestrian, and me: Investigating the interactions, errors and escalating risks of users of fully protected level crossings. *Safety Science*. – Vol. 110. – December 2018. – Pp. 80–88.
27. Liang C., Ghazel M., Cazier O., El-Koursi E.-M. A new insight on the risky behavior of motorists at railway level crossings: An observational field study. *Accident Analysis and Prevention*. – Vol. 108. – November 2017. – Pp. 181–188.
28. Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Безопасность движения при остановке автотранспорта на железнодорожных переездах перед приближающимся поездом//Транспорт Урала. – Екатеринбург: УрГУПС, 2020. – № 1 (64). – С. 39–42.
29. Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2006. – 392 с.
30. Правила тяговых расчетов: распоряжение от 12.05.2016. № 867 р – Москва: ОАО «РЖД», 2016. – 514 с.
31. Теория электрической тяги/В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров; под ред. И. П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.
32. Исаев И. П. Случайные факторы и коэффициент сцепления. М.: Транспорт, 1970. – 182 с.
33. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. – 6-е изд. стер. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
34. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников/А. И. Кобзарь – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 816 с.
35. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах/Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1969. – 395 с.
36. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография/Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.

**Popov A. N., Ph. D.
Grishaev S. Yu.**

*Department of "Automation, Remote Control and Communication in Railway Transport",
Ural State University of Railways, Yekaterinburg*

ASSESSMENT OF EMERGENCY PROBABILITY AT THE TIME OF VEHICLE INVOLUNTARY STOP ON THE RAILWAY CROSSING

Interest in the problem of delimiting the flows of road and rail transport at crossings is due to the increased risk of traffic accidents and the need to wait for the opening of the crossing for cars when the train passes through and the losses associated with this waiting. Over time, the severity of the problem only grows – there are more and more cars, the intensity and speed of traffic increases, as does the weight of trains.

The most effective means of solving the problem of delimiting traffic flows at crossings is their separation at different levels through the construction of overpasses. A significant drawback of overpass

construction, which does not allow to completely solve the problem in an acceptable timeframe, is the high capital costs of construction. Therefore, for most crossings located at the same level, the main means of controlling traffic flows is the automatic crossing signaling (APS), the principles of which have remained practically unchanged since the middle of the last century, whereabouts the conditions for its operation have significantly deteriorated.

According to the existing method for calculating I-276-00, the time of notification of the train approaching is determined depending on the maximum speed of trains at the crossing and the number of railway tracks across which the road passes, but the characteristics of the train and the length of its braking path are not taken into account. Previous studies have shown that with the minimum width of the crossing established by the existing methodology, the stop of freight trains before the crossing after its closure is guaranteed only for speeds of no more than 30 km/h, the stop of passenger trains is no more than 60 km/h.

At higher speeds, the braking distance may not be enough, which will lead to a collision in the event of a forced stop of vehicles at a level crossing. Trains crossing a level crossing have different characteristics: travel speed and braking factors. Therefore, it is required to assess the likelihood of a collision when the vehicle is forced to stop at a level crossing.

The paper investigates the situation of a car breakdown at a railway crossing. Based on the data obtained from the locomotive on-board complexes, histograms of the distributions of the speed and the actual braking factors of trains approaching the crossing were constructed. On the basis of the obtained statistical data, the hypothesis of the subordination of the actual stopping of trains to the theoretical Cauchy distribution is confirmed. A statistical model of the distribution of the speed of trains when approaching a crossing is proposed.

A method is given for assessing the probability of a collision with a train in case of a car breakdown at a level crossing. The numerical value of the collision probability estimate was obtained by the method described in the work. The necessity of developing the APS control system based on the characteristics of the approaching train has been substantiated.

Level crossing, automatic crossing signaling, notification area, braking distance, notification time, onboard locomotive complexes.

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-21-38

References

1. Larue G., Miska M., Qian G., Wullems C., Rodwell D., Chung E., Rakotonirainy A. (2020) Can road user delays at urban railway level crossings be reduced? Evaluation of potential treatments through traffic simulation. *Case Studies on Transport Policy*, vol. 8, iss. 3, September, pp. 860–869.
2. Gurevich V.L., Shchigolev S.A. (2015) Ustroystva zagrazhdeniya na pereyezdakh bez dezhurnogo rabotnika [Barrage devices at level crossings without a duty employee]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no 5, pp. 4–7. (In Russian)
3. Cheblakov V.A., Kataev M.N. (2020) Novyye sistemy pereyezdnoy signalizatsii [New crossroads signaling systems]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 7, pp. 5–7. (In Russian)
4. Dolgiy A. I., Khatlamadzhian A. E., Shapovalov V. V., Kucherenko P. A., Shapekin A. E. (2020) Sistema avtomatizirovannogo udalennogo upravleniya pereyezdami [Automated Distant Management System of Railway Grade Crossings]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 7, pp. 4–7. (In Russian)
5. Tilk I. G., Sergeev B. S. (2006) Primeneniye ustroystv scheta osey v pereyezdnoy signalizatsii [Using of axle counting devices in level crossing signaling]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], no. 2 (9), pp. 37–41. (In Russian)

6. Shchigolev S. A., Tatievsky S. A. (2005) Avtomaticheskaya pereyezdnyaya signalizatsiya na schetchikakh osey [Automatic level crossing signaling on axle counters]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 12, pp. 57–58. (In Russian)
7. Tilk I. G. (2010) *Novyye ustroystva avtomatiki i telemekhaniki zheleznodorozhnogo transporta* [New devices for automation and telemechanics of railway transport]. Ekaterinburg, Ural State Transport University Publ., 167 p. (In Russian)
8. Efanov D. V., Plotnikov D. G., Osadchiy G. V. (2018) Servis prognozirovaniya vremennykh parametrov raboty zheleznodorozhnogo pereyezda [Service for forecasting the time parameters of the railway crossing]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], no. 4 (77), pp. 31–36. (In Russian)
9. Efanov D. V., Osadchiy G. V., Plotnikov D. G., Khoroshev V. V. (2018) Kompleksnyy uchet parametrov obyektov infrastruktury zheleznoy dorogi, zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i avtomobil'nogo transporta dlya obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na pereyezdakh [Comprehensive accounting of parameters of railway infrastructure facilities, railway rolling stock and road transport to ensure traffic safety at level crossings]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], no. 2, vol. 4, pp. 167–194. (In Russian)
10. Gerus V. L., Tarasov E. M., Tarasova A. E. (2018) Issledovaniye informativnosti priznakov pri raspoznavanii sostoyaniy rel'sovykh liniy [Studying of the informativeness of features in recognizing the states of rail lines]. *Vestnik Mordovskogo universiteta*. [Bulletin of the Mordovian University], no. 2, vol. 28, pp. 191–207. (In Russian)
11. Tarasov E. M., Zheleznov D. V., Gerus V. L. (2015) Otsenka effektivnosti sushchestvuyushchey pereyezdnoy signalizatsii [Evaluation of the effectiveness of the existing crossing signaling]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Volga Transport Bulletin], no. 6 (54), pp. 58–61. (In Russian)
12. Masaytis Yu. L. (1997) Pereyezdnoy avtomaticheskii kompleks ustroystv [Crossing automatic complex of devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 11, p. 27. (In Russian)
13. Kamenskiy V. B., Tyupkin Yu. A., Pozdnyakov V. A. (1999) Organizatsii bezopasnosti dvizheniya na pereyezdakh – kompleksnuyu sistemnyuyu osnovu [An integrated system framework for traffic safety organizations at level crossings]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport], no. 1, pp. 46–50. (In Russian)
14. Grachev G. N., Gumenik M. B. (1997) Primeneniye metoda impul'snogo zondirovaniya dlya organizatsii pereyezdnoy signalizatsii [Using of the method of impulse sounding for the organization of crossing signaling]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 11, pp. 28–30. (In Russian)
15. Nikitin A. B., Boltaev S. T. (2016) Obespecheniye bezopasnosti na stantsionnykh pereyezdakh pri organizatsii vysokoskorostnogo dvizheniya na deystvuyushchikh liniyakh [Ensuring safety at station crossings when organizing high-speed traffic on existing lines]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Railways], no. 2, pp. 206–214. (In Russian)
16. Kirillov A. N. (2016) Modernizatsiya skhem avtomaticheskoy pereyezdnoy signalizatsii [Modernization of automatic crossing signaling schemes]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 9, pp. 30–31. (In Russian)
17. Godyaev A. I. (2004) *Sistema podderzhki prinyatiya resheniy v zadachakh obespecheniya bezopasnosti zheleznodorozhnogo pereyezda: Monografiya* [Decision support system in the tasks of ensuring the safety of railway crossing: Monograph]. Khabarovsk, Dal'nevostochnyy Gosudarstvennyy Universitet Putey Soobshcheniya [Far Eastern State Transport University] Publ., p. 92. (In Russian)

18. Godyaev A. I. (2004) Bezopasnost' na pereyездakh i sposoby snizheniya avariynosti [Safety at level crossings and ways to reduce accidents]. *Mir transporta*. [The world of transport], no. 4 (8), vol. 2, pp. 80–85. (In Russian)
19. Abioye O. F., Dulebenets M. A., Pasha J. et al. (2020) *Accident and hazard prediction models for highway–rail grade crossings: a state-of-the-practice review for the USA*. Rail. Eng. Science 28, 251–274. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00215-w>.
20. Chris De Gruyter & Graham Currie (2016) Rail-road crossing impacts: an international synthesis. *Transport Reviews*, 36:6, 793–815.
21. Gitelman V., Hakkert A. S. (1997) The evaluation of road-rail crossing safety with limited accident statistics. *Accident Analysis & Prevention*, vol. 29, iss. 2, March, pp. 171–179.
22. Borsos A., Gabor M., Koren C. (2016) Safety ranking of railway crossings in Hungary. *Transp Res Procedia*, 14:2111–2120.
23. Liang C., Ghazel M., Cazier O. et al (2017) Risk analysis on level crossings using a causal Bayesian network based approach. *Transp Res Procedia*, 25:2167–2181.
24. Davey J., Wallace A., Stenson N., Freeman J. (2008) The experiences and perceptions of heavy vehicle drivers and train drivers of dangers at railway level crossings. *Accident Analysis and Prevention*, vol. 40, iss. 3, May, pp. 1217–1222.
25. Haleem K., Gan A. (2015) Contributing factors of crash injury severity at public highway-railroad grade crossings in the U. S. *Journal of Safety Research*, vol. 53, 1 June, pp. 23–29.
26. Larue G. S., Naweed A., Rodwell D. (2018) The road user, the pedestrian, and me: Investigating the interactions, errors and escalating risks of users of fully protected level crossings. *Safety Science*, vol. 110, December, pp. 80–88.
27. Liang C., Ghazel M., Cazier O., El-Koursi E.-M. (2017) A new insight on the risky behavior of motorists at railway level crossings: An observational field study. *Accident Analysis and Prevention*, vol. 108, November, pp. 181–188.
28. Popov A. N., Grishayev S. Yu. (2020) Bezopasnost' dvizheniya pri ostanovke avtotransporta na zheleznodorozhnykh pereyездakh pered priblizhayushchimsya poyezdom [Traffic safety of stopping vehicles at railway crossings in front of an approaching train]. *Transport Urala*. [Ural transport], no. 1 (64), pp. 39–42. (In Russian)
29. Asadchenko V. R. (2006) *Avtomaticheskkiye tormoza podvizhnogo sostava: Uchebnoye posobiye dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta*. [Automatic brakes of rolling stock: a textbook for universities of railway transport]. Moscow, Marshrut Publ., 392 p. (In Russian)
30. *Pravila tyagovykh raschetov: rasporyazheniye ot 12.05.2016* [Traction calculation rules: order dated 12.05.2016], no. 867. Moscow, JSC “Russian Railways” Publ., 2016. 514 p. (In Russian)
31. Rosenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N., Ozerov M. I. (1995) *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Electric traction theory]. Moscow, Transport Publ., 294 p. (In Russian)
32. Isaev I. P. (1970) *Sluchaynyye faktory i koeffitsiyent stsepleniya*. [Random factors and coefficient of adhesion]. Moscow, Transport Publ., 182 p. (In Russian)
33. Venttsel' Ye. S. (1999) *Teoriya veroyatnostey: Uchebnik dlya vuzov. 6-oe izdanie* [Probability theory: Textbook for universities. 6th edition]. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 576 p. (In Russian)
34. Kobzar' A. I. (2012) *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*. [Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 816 p. (In Russian)
35. Khan G., Shapiro S. (1969) *Statisticheskkiye modeli v inzhenernykh zadachakh*. [Statistical models in engineering problems]. Moscow, Mir Publ., 395 p. (In Russian)

36. В. Yu. Lemeshko, S. B. Lemeshko, S. N. Postovalov, E. V. Chimitova (2011) *Statisticheskiiy analiz dannykh, modelirovaniye i issledovaniye veroyatnostnykh zakonomernostey. Komp'yuternyy podkhod: monografiya* [Statistical data analysis, modeling and research of probabilistic patterns. Computer approach: monograph]. Novosibirsk, Publishing house of Novosibirsk State Technical University Publ., 888 p. (In Russian)

Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным
Поступила 24.09.2020, принята к публикации 20.10.2020

ПОПОВ Антон Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения
e-mail: ANPopov@usurt.ru

ГРИШАЕВ Сергей Юрьевич — первый заместитель генерального директора — главный конструктор ФГУП «ПО «Октябрь»
e-mail: gsu82@bk.ru

© Попов А. Н., Гришаев С. Ю., 2020