

Оценка рисков, связанных с проездом запрещающего сигнала светофора маневровым составом или пассажирским поездом¹

Игорь Б. Шубинский, ЗАО «ИБТранс», Москва, Россия, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru
Алексей М. Замышляев, ОАО «НИИАС», Москва, Россия, e-mail: A.Zamyslyayev@vniias.ru
Алексей Н. Игнатов, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: alexei.ignatov1@gmail.com
Юрий С. Кан, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: yu_kan@mail.ru
Андрей И. Кибзун, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: kibzun@mail.ru
Евгений Н. Платонов, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: en.platonov@gmail.com



И.Б. Шубинский



А.М. Замышляев



А.Н. Игнатов



Ю.С. Кан



А.И. Кибзун



Е.Н. Платонов

Цель. Разработка методики, позволяющей оценить риски, возникающие вследствие проезда маневровым или поездным локомотивом запрещающего сигнала светофора и выработать рекомендации, позволяющие снизить риск столкновения при проведении маневровых работ на станции. **Методы.** Для достижения поставленной цели в работе определяется среднее число взрезанных стрелок маневровыми составами без последующего схода, а также среднее число сходов маневровых составов с рельсов за год. По имеющимся статистическим данным проводится расчет среднего размера ущерба от одного столкновения, взреза стрелки без последующего схода, а также взреза стрелки с последующим сходом. Для вычисления среднего размера ущерба, который возникает при столкновении вследствие получения некоторой травмы человеком, рассматриваются различные виды травм. Травмы классифицируются по уровню последствий, которые пересчитываются в денежном эквиваленте при помощи минимального размера оплаты труда. Для учета вариативности в выборе маршрута и для получения вероятности столкновения пассажирского поезда при проезде через станцию используется формула полной вероятности. Для получения вероятности хотя бы одного столкновения за год используется формула умножения вероятности. Для получения среднего числа взрезов и сходов определяется общее число стрелок, пересекаемых маневровыми составами на станции за год, а для определения вероятности взреза и схода при одном проезде через стрелку – формула умножения вероятностей. Для определения уровня риска от рассматриваемого неблагоприятного события строятся матрицы риска, позволяющие определить, имеет ли необходимость в проведении срочных мер по снижению уровня риска. **Результаты.** Исследована проблема расчета риска неблагоприятных событий, вызванных проездом пассажирским поездом или маневровым составом запрещающего сигнала светофора. Приведены формулы расчета вероятности хотя бы одного столкновения на станции пассажирского поезда за год, среднего количества взрезанных стрелок маневровым составом без последующего схода, среднее число сходов с рельсов за год. Приведены формулы по расчету среднего ущерба от неблагоприятных событий. Построены матрицы рисков для всех неблагоприятных событий. Приведен пример использования полученных результатов, основанный на гипотетических данных, реальных данных и экспертных оценках. **Выводы.** При помощи полученной в работе методике была продемонстрирована ее применимость на практике. Было получено, что для рассмотренного набора входных данных никаких мер по снижению риска от взрезов и сходов на рассматриваемой станции проводить не следует. В то же время риск от столкновений находится в оранжевой зоне – зоне нежелательного риска, вследствие чего необходимо проводить меры по снижению риска. При этом количественное значение риска от взрезов оказывается больше, чем риск от столкновений. Это обстоятельство связано с тем, что при столкновении ОАО «РЖД» несет дополнительные репутационные издержки, усугубляющиеся тем фактом, что столкновение происходит на станции с большим количеством людей.

Ключевые слова: вероятность столкновения, взрез, сход, ущерб, матрица рисков.

Формат цитирования: Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кан Ю.С., Кибзун А.И., Платонов Е.Н. Оценка рисков, связанных с проездом запрещающего сигнала светофора маневровым составом или пассажирским поездом // Надежность. 2016. №3. С. 39-46. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-39-46

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-11-00062).

Введение

При проезде маневровым составом запрещающего сигнала светофора возможны несколько неблагоприятных событий: его столкновение с пассажирским или грузовым поездами, взрез стрелочного перевода без схода маневрового состава, сход маневрового состава с рельсов. Каждое из этих событий происходит с определенной интенсивностью или вероятностью. При этом каждое из этих событий характеризуется определенным ущербом. Поэтому актуальной является задача количественной оценки рисков для поддержания их на допустимом уровне [1].

В работе [2] проводится расчет вероятности бокового столкновения маневрового состава и пассажирского поезда, когда один из участников движения проехал светофор с запрещающим показанием, на определенном маршруте следования пассажирского поезда, где под маршрутом понимается набор стрелочных переводов, которые пассажирский поезд пересекает при движении через станцию. Изолированным стрелочным переводом называется тот, на котором столкновение, вызванное проездом запрещающего сигнала, произойти не может, неизолированный стрелочный перевод – тот, на котором столкновение возможно. Однако при пересечении станции у пассажирского поезда имеется несколько возможных маршрутов передвижения, которые используются с определенной интенсивностью.

В настоящей работе для учета вариативности в выборе маршрута и для получения вероятности хотя бы одного столкновения пассажирского поезда при проезде через станцию используется формула полной вероятности. Для получения вероятности хотя бы одного столкновения за год используется формула умножения вероятности. Для получения среднего числа взрезов и сходов определяется общее число стрелок, пересекаемых маневровыми составами на станции за год, а для определения вероятности взреза и схода при одном проезде через стрелку – формула умножения вероятностей.

Поскольку рассматриваются транспортные происшествия на железнодорожной станции, то при столкновении пассажирского поезда и маневрового состава как на самой станции, так и в пассажирском поезде возможны человеческие жертвы, поэтому в настоящей работе средний ущерб от одного столкновения пассажирского поезда и маневрового состава складывается из ущерба от повреждения железнодорожной инфраструктуры при столкновении: железнодорожного полотна, вагонов и т.д. и последствий от гибели людей, количественное выражение которого получается на основе [1]. Ущерб от взрезв и сходов строится на основании последствий от повреждения железнодорожной инфраструктуры, а гибель людей при этом маловероятна, поскольку маневровые работы проводятся на небольшой скорости. Матрицы риска строятся на основании подхода, изложенного в [1].

Расчет вероятности хотя бы одного столкновения маневрового состава и пассажирского поезда за год

Согласно расписанию, получаемому из АСУ «Экспресс» на рассматриваемый промежуток времени (год), присвоим номера пассажирским поездам, пересекающим рассматриваемую нами станцию согласно порядку их прибытия, то есть первый прибывающий поезд, получает номер 1, второй – номер 2 и т.д. Рассмотрим i -ый пассажирский поезд из этого набора.

Пусть A_i – столкновение пассажирского поезда с номером i при движении через станцию, а $P(A_i | R_k)$ – вероятность столкновения пассажирского поезда с номером i при движении через станцию по маршруту R_k , где $k=1, \dots, K$, а K – общее число возможных маршрутов для поезда с номером i . Тогда вероятность столкновения пассажирского поезда с номером i при движении через станцию равна [2]

$$P(A_i) = \sum_{k=1}^K P(A_i | R_k) P(R_k),$$

где $P(R_k)$ – вероятность использования маршрута R_k определяется по формуле

$$P(R_k) = \frac{m_{R_k}}{n},$$

где m_{R_k} – число проехавших пассажирских поездов с номером i по маршруту R_k , а n – общее число пассажирских поездов с номером i , проехавших через станцию за время наблюдения. Если данные о прошлых пересечениях станции пассажирским поездом с номером i отсутствуют, а организация мониторинга за движением не представляется возможной, то вероятность использования всех маршрутов можно положить равновероятной, то есть

$$P(R_k) = \frac{1}{K}.$$

Вероятность $P(A_i | R_k)$ определяется при помощи следующей формулы, полученной в [2],

$$P(A_i | R_k) = P(A_{k:1}) + (1 - P(A_{k:1})) \cdot P(A_{k:2}) + \\ + (1 - P(A_{k:1})) \cdot (1 - P(A_{k:2})) \cdot P(A_{k:3}) + \dots,$$

где $P(A_{k:j})$ – вероятность столкновения поезда с номером i , пересекающего станцию по маршруту R_k , на j -м по порядку пересечения поездом стрелочном переводе. В свою очередь $P(A_{k:j})$ вычисляется по формуле

$$P(A_{k:j}) = \left(\lambda_m \left(\frac{l_n}{v_n} + \frac{l_m}{v_m} \right) (P_m (1 + P_n) + P_n) + \right. \\ \left. + \lambda_c P_n \tau_c + \lambda_m P_m P_{nc} \tau_{nc} \right) \cdot k_c,$$

где k_c – коэффициент изолированности стрелки (1, если стрелочный перевод неизолированный, и 0, если стрелочный перевод изолированный);

λ_m – интенсивность следования маневровых составов через j -ую стрелку, в направлении, при котором возмож-

но боковое столкновение (для простоты можно предположить, что $\lambda_m = \tilde{\lambda}_m / 4$, где $\tilde{\lambda}_m$ – общая (суммарная) интенсивность следования маневровых составов через j -ую стрелку во всех направлениях);

λ_c – интенсивность останавливающихся на j -ом стрелочном переводе маневровых групп, не нарушивших при пересечении стрелки безопасности движения;

τ_c – среднее время нахождения на j -ом стрелочном переводе маневровой группы, не нарушившей при пересечении стрелки безопасности движения, при условии остановки на стрелочном переводе;

l_n – средняя длина пассажирского поезда;

v_n – средняя скорость движения пассажирского поезда по станции;

l_m – средняя длина маневровой группы;

v_m – средняя скорость движения маневровой группы по станции;

P_n – вероятность проезда запрещающего сигнала пассажирским поездом;

P_{nc} – вероятность остановки пассажирского поезда на стрелочном переводе;

τ_{nc} – среднее время стоянки пассажирского поезда на стрелочном переводе;

P_m – вероятность проезда запрещающего сигнала маневровым составом, вычисляемая по формуле [2]

$$P_m = P_{\text{двое}} \cdot P_{m(\text{двое})} + (1 - P_{\text{двое}}) \cdot P_{m(\text{один})}$$

где $P_{\text{двое}}$ – вероятность комплектования локомотивной бригады маневрового локомотива машинистом и его помощником;

$P_{m(\text{двое})}$ – вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим показанием при работе с помощником машиниста;

$P_{m(\text{один})}$ – вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим показанием при работе без помощника машиниста («в одно лицо»).

Пусть на станции за год в различных направлениях следуют I поездов. Рассмотрим i -й поезд из этого набора, $i=1, \dots, I$. Если ему соответствует вероятность $P(A_i)$ столкновения при проезде через станцию, то вероятность столкновения хотя бы одного поезда из I штук равна [2]

$$P(A_{\text{год}}) = P(A_1 + A_2 + \dots + A_I) = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - P(A_i)). \quad (1)$$

Расчет среднего количества взрезов и сходов маневрового состава за год

Пусть L – общее количество локомотивов, работающих на станции, а N_i – среднее количество стрелок, проезжаемых в час маневровым составом с локомотивом с номером i . Тогда общее количество $N_{\text{год}}$ стрелок, которые пересекают маневровые составы на станции вычисляется по формуле

$$N_{\text{год}} = 365 \cdot 24 \cdot \sum_{i=1}^L N_i. \quad (2)$$

Рассмотрим несколько случайных событий: A_m – проезд запрещающего сигнала светофора маневровой группой, $A_{\text{вз}}$ – взрез стрелки маневровой группой после проезда запрещающего сигнала, $A_{\text{сх}}$ – сход с рельсов после взреза стрелки. Пусть известны (например, оценены экспертным путем) вероятность взреза после проезда запрещающего сигнала светофора $P_{\text{вз}}$ и вероятность схода с рельсов после взреза стрелки $P_{\text{сх}}$. Тогда вероятность взреза стрелки с последующим сходом подвижного состава определяется по формуле умножения вероятностей [3]

$$P_{\text{вз(со сходом)}} = P(A_m A_{\text{вз}} A_{\text{сх}}) = P_m P_{\text{вз}} P_{\text{сх}}, \quad (3)$$

а вероятность взреза стрелки без последующего схода подвижного состава аналогично по формуле умножения вероятностей равна

$$P_{\text{вз(без схода)}} = P(A_m A_{\text{вз}} \bar{A}_{\text{сх}}) = P_m P_{\text{вз}} (1 - P_{\text{сх}}). \quad (4)$$

Поскольку при каждом проезде через стрелку возможен сход с рельсов или взрез стрелки, то число взрезанных стрелок без последующего схода является случайной величиной, имеющей биномиальное распределение с параметрами $N_{\text{год}}$ и $P_{\text{вз(без схода)}}$, а число сошедших подвижных составов является случайной величиной, имеющей биномиальное распределение с параметрами $N_{\text{год}}$ и $P_{\text{вз(со сходе)}}$. Поэтому среднее число взрезанных стрелок без последующего схода определяется перемножением числа испытаний и числа «успехов», то есть вычисляется по формуле [3]

$$\bar{N}_{\text{вз}}^{\text{вз}} = N_{\text{год}} \cdot P_{\text{вз(без схода)}}, \quad (5)$$

а среднее число взрезанных стрелок с последующим сходом вычисляется по формуле

$$\bar{N}_{\text{вз}}^{\text{сх}} = N_{\text{год}} \cdot P_{\text{вз(со сходе)}}. \quad (6)$$

Определение среднего ущерба от неблагоприятных событий

Рассмотрим вначале ущерб, возникающий при столкновении. Ущерб от столкновения на станции состоит из двух частей. Первой частью является материальный ущерб от повреждения вагонов, путей, инфраструктуры станции, груза и т.д. Данные виды ущерба фиксируются в протоколах транспортных происшествий и могут быть вычислены как средние величины. Второй частью является ущерб, связанный с возможной гибелью людей или причинением вреда здоровью человека.

Пусть имеется $M_{\text{см}}$ протоколов столкновений. Тогда средняя величина материального ущерба, вычисленная по всем происшествиям, вычисляется по формуле

$$\bar{C}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{M_{\text{см}}} C_{\text{см}}^i}{M_{\text{см}}}, \quad (7)$$

где $C_{\text{см}}^i$ – материальный ущерб от столкновения, зафиксированный в i -м протоколе.

Вычислим средний ущерб, связанный с возможной гибелью людей или причинением вреда здоровью человека. Разделим травмы, происходящие при транспортном происшествии, на классы: причиняющие средний вред здоровью; причиняющие тяжкий вред здоровью; вызывающие гибель человека. Пусть N_{cm}^i – количество погибших людей в i -м столкновении, $N_{тя}^i$ – количество людей, которым причинен тяжкий вред здоровью в i -м столкновении, N_{cp}^i – количество людей, которым причинен средний вред здоровью в i -м столкновении, C_{cp} – ущерб при причинении среднего вреда здоровью одному человеку, $C_{тя}$ – ущерб при причинении тяжкого вреда здоровью одному человеку, C_{cm} – ущерб при гибели одного человека. Таким образом, средний ущерб от возможной гибели людей или причинения вреда здоровью человека при одном столкновении составляет

$$\bar{C}_2 = C_{cm} \frac{\sum_{i=1}^{M_{cm}} N_{cm}^i}{M_{cm}} + C_{тя} \frac{\sum_{i=1}^{M_{тя}} N_{тя}^i}{M_{тя}} + C_{cp} \frac{\sum_{i=1}^{M_{cp}} N_{cp}^i}{M_{cp}}.$$

Величины C_{cp} , $C_{тя}$, C_{cm} найдем, исходя из [1]. Гибель одного человека приравнивается к материальному ущербу в 5000 МРОТ, тяжкий вред здоровью к 1000 МРОТ, вред средней тяжести к 500 МРОТ. Величина МРОТ с 1 января 2016 года составляет 6204 руб. [4]. Таким образом,

$$C_{cp} = 6,204 \cdot 500 = 3102 \text{ тыс. руб.},$$

$$C_{тя} = 6,204 \cdot 1000 = 6204 \text{ тыс. руб.},$$

$$C_{cm} = 6,204 \cdot 5000 = 31020 \text{ тыс. руб.}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \bar{C}_2 &= 3102 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{M_{cp}} N_{cp}^i}{M_{cp}} + 6204 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{M_{тя}} N_{тя}^i}{M_{тя}} + 31020 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{M_{cm}} N_{cm}^i}{M_{cm}} = \\ &= \frac{1}{M_{cm}} \left(3102 \cdot \sum_{i=1}^{M_{cp}} N_{cp}^i + 6204 \cdot \sum_{i=1}^{M_{тя}} N_{тя}^i + 31020 \cdot \sum_{i=1}^{M_{cm}} N_{cm}^i \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Поскольку общий ущерб от столкновений $\bar{C}_{cm}$ складывается из материального ущерба и ущерба от причинения вреда здоровью, то

$$\begin{aligned} \bar{C}_{cm} &= \bar{C}_1 + \bar{C}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{M_{cm}} C_{cm}^i}{M_{cm}} + \\ &+ \frac{1}{M_{cm}} \left(3102 \cdot \sum_{i=1}^{M_{cp}} N_{cp}^i + 6204 \cdot \sum_{i=1}^{M_{тя}} N_{тя}^i + 31020 \cdot \sum_{i=1}^{M_{cm}} N_{cm}^i \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Рассмотрим теперь ущерб, возникающий при врезках и сходах. Пусть имеется $M_{вз}$ протоколов врезок без сходов, в которых был зафиксирован некоторый ущерб. Тогда средняя величина материального ущерба, вычисленная по всем происшествиям, вычисляется по формуле

$$\bar{C}_{вз} = \frac{\sum_{i=1}^{M_{вз}} C_{вз}^i}{M_{вз}}, \quad (10)$$

где $C_{вз}^i$ – материальный ущерб от врезки стрелки, зафиксированный в i -м протоколе. Аналогично если имеется $M_{сх}$ протоколов врезок с последующим сходом, в которых был зафиксирован некоторый ущерб, то средняя величина материального ущерба, вычисленная по всем происшествиям, вычисляется по формуле

$$\bar{C}_{сх} = \frac{\sum_{i=1}^{M_{сх}} C_{сх}^i}{M_{сх}}, \quad (11)$$

где $C_{сх}^i$ – материальный ущерб от врезки с последующим сходом, зафиксированный в i -м протоколе.

Оценивание величины риска

Для определения уровня риска после завершения анализа частот и анализа последствий проводится количественная или качественная оценка. В общем случае согласно [1] риск представляет некоторый функционал от двух величин – вероятности (частоты) нежелательного события $P(A)$ и его последствий $C(A)$. В настоящей работе будем рассматривать количественную величину риска как произведение вероятности (частоты) на ущерб. Таким образом, риск от столкновений, вызванных проездом запрещающего сигнала одним из участников движения, вычисляется по формуле

$$R_{cm} = P(A_{сод}) \cdot \bar{C}_{cm}, \quad (12)$$

где $P(A_{сод})$ вычисляется по формуле (1), а $\bar{C}_{cm}$ по формуле (9) соответственно. Риски от врезок без последующего схода и с последующим сходом вычисляются по формулам

$$R_{вз} = \bar{N}_{сод}^{вз} \cdot \bar{C}_{вз}, \quad (13)$$

$$R_{сх} = \bar{N}_{сод}^{сх} \cdot \bar{C}_{сх}, \quad (14)$$

где величины $\bar{N}_{сод}^{вз}$, $\bar{N}_{сод}^{сх}$, $\bar{C}_{вз}$, $\bar{C}_{сх}$ вычисляются по формулам (5), (6), (10), (11) соответственно.

Построение матриц риска

Представление результатов оценивания риска может быть осуществлено с помощью матрицы рисков, которая представляет собой таблицу с сочетанием частоты возникновения события и тяжести последствий этого события (рисунок 1) и позволяет в наглядной форме проинформировать лица, принимающие решения, об уровнях рисков для рассматриваемого события. Форма (размерность) матрицы зависит от области ее применения.

Матрица риска строится следующим образом:

– по вертикальной оси отсчитываются частоты (вероятности) возникновения события, представленные в

соответствии с принятой (как правило, логарифмической) шкалой частот;

– по горизонтальной оси отсчитываются размеры последствий возникновения события, представленные в соответствии с принятой (как правило, логарифмической) шкалой тяжести последствий;

– проводится определение и ранжирование уровня риска для каждой ячейки матрицы.

Основной проблемой при построении матриц риска является правильный выбор границ для ячеек матрицы. Одна и та же ячейка содержит точки с разными значениями риска, при этом часть точек относится, например, к области «допустимого» риска, а часть точек к области «нежелательного» риска. В наиболее неблагоприятном случае ячейка может разделиться на два сегмента одинаковой площади, из-за чего нельзя точно определить к какой области значений риска относится большинство точек, расположенных внутри ячейки.

В статье [5] предложена методика выбора границ для ячеек матрицы риска, позволяющая решить данную проблему.

В [1] в качестве типовой шкалы для вероятности рекомендуется шкала, имеющая 6 уровней (градаций). В качестве типовой шкалы последствий рекомендуется шкала, имеющая 4 уровня (градации).

Границы для ячеек матрицы рисков выберем в рамках подхода, предложенного в [1].

Минимальное и максимальное значения вероятности приняты равными 0 и 1 из условия нормировки вероятности случайного события. Наиболее неблагоприятное событие (частое) задаётся границей 0,5, т.е. транспортное происшествие происходит чаще, чем не происходит. Границы для маловероятного и редкого события выбираются в логарифмической шкале так, что бы они были на порядок меньше, т.е. 0,05 и 0,005 соответственно. Значение 0,05 является самым распространенным для вероятности редкого события. Промежуточные границы между уже заданными значениями выбираются в логарифмической шкале так, чтобы величина этих ячеек была примерно одинаковой. Поэтому граница, задающая переход от вероятного события к случайному событию задаётся равной 0,15 (примерно в три раз меньше, чем 0,5 и в три

раз больше, чем 0,05). Аналогично для границы перехода от редкого события к крайне редкому. Уровни вероятности возникновения столкновений приведены в таблице 1.

Если же вместо вероятности нежелательного события мы строим оценку средней частоты появления опасного случая, то в [1] в таблице А.5 предложены следующие уровни частот (таблица 2). Для нашего случая данный вариант выбора уровня частот является также обоснованным.

При выборе границ для тяжести последствий будем руководствоваться ущербом, который будет вызван смертью человека. В соответствии с таблицей 2 ГОСТ Р 54505 катастрофический риск наступает при гибели одного или более человек, что приравнивается к величине в 5000 МРОТ = 30000 тыс. руб. Две

Таблица 1. Уровни вероятности возникновения столкновений

Уровни вероятности	Вероятность событий в год, $P(A)$	Описание
Частое	$P(A) > 0,5$	Постоянное наличие опасности
Вероятное	$0,15 \leq P(A) < 0,5$	Ожидается частое возникновение опасного события
Случайное	$0,05 \leq P(A) < 0,15$	Ожидается неоднократное возникновение опасного события
Редкое	$0,015 \leq P(A) < 0,05$	Вероятность того, что событие будет иногда возникать на протяжении жизненного цикла объекта.
Крайне редкое	$0,005 \leq P(A) < 0,015$	Можно предположить, что опасное событие может возникнуть в исключительном случае.
Маловероятное	$P(A) \leq 0,005$	Можно предположить, что опасное событие не возникнет.

Уровни вероятности	Уровни риска			
	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Частое	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Вероятное	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный	Недопустимый
Случайное	Допустимый	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый
Редкое	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный
Крайне редкое	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Допустимый	Нежелательный
Маловероятное	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный
	Незначительный	Серьёзный	Критический	Катастрофический
	Уровни тяжести последствия			

Рис. 1. Форма матрицы рисков

Таблица 2. Уровни частот

Уровни частоты	Количественное значение, $P^*(A)$, 1/год	Описание
Частое	$P^*(A) \geq 100$	Постоянное наличие опасности
Вероятное	$40 \leq P^*(A) < 100$	Ожидается частое возникновение опасного события
Случайное	$15 \leq P^*(A) < 40$	Ожидается неоднократное возникновение опасного события
Редкое	$6 \leq P^*(A) < 15$	Вероятность того, что событие будет иногда возникать на протяжении жизненного цикла объекта.
Крайне редкое	$2 \leq P^*(A) < 6$	Можно предположить, что опасное событие может возникнуть в исключительном случае.
Маловероятное	$P^*(A) < 2$	Можно предположить, что опасное событие не возникнет.

Таблица 3. Уровни тяжести последствий

Уровни			
Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
менее 300 тыс. руб.	от 300 до 3000 тыс. руб.	от 3000 до 30000 тыс. руб.	более 30000 тыс. руб.

других границы выбраны в логарифмической шкале и отличаются на один и два порядка соответственно (таблица 3).

Уровни вероятности	Уровни риска			
	Частое	Вероятное	Случайное	Редкое
1	300	3000	30000	
0,5	150	1500	15000	
0,15	45	450	4500	
0,05	15	150	1500	
0,015	4,5	45	450	
0,005	1,5	15	150	
0	Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
	300	3000	30000	Уровни тяжести последствия

Рис. 2. Матрица рисков столкновений

Выполним ранжирование ячеек матрицы. Для этого перемножим верхние значения частоты и тяжести последствий, соответствующие каждой ячейке и в зависимости от результата назначим ей категорию (рисунки 2 и 3).

	Уровни частот, 1/год	Уровни риска			
	Частое	Вероятное	Случайное	Редкое	Крайне редкое
100		30000	300000	3000000	
40		12000	120000	1200000	
15		4500	45000	450000	
6		1800	18000	180000	
2		600	6000	60000	
0		Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
		300	3000	30000	Уровни тяжести последствия

Рис. 3. Матрица рисков сходов и взрывов стрелки

Пример

Согласно данным из системы АСРБ за 2011-2015 годы произошло 64 транспортных происшествий со столкновением, в которых был зафиксирован ущерб (его размеры приведены в таблице 4), а также 78 случаев, в которых ущерб не был зафиксирован.

Согласно формуле (7) получаем

$$\bar{C}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{64} C_{cm}^i + \sum_{i=65}^{142} 0}{78 + 64} \approx 488 \text{ тыс. руб.}$$

Пусть $\sum_{i=1}^{142} N_{cp}^i = 23$, $\sum_{i=1}^{142} N_{тя}^i = 10$, $\sum_{i=1}^{142} N_{см}^i = 1$, тогда по формуле (8) получаем

$$\bar{C}_q = \frac{1}{142} (3102 \cdot 23 + 6204 \cdot 10 + 31020 \cdot 1) = 1158 \text{ тыс. руб.}$$

Тогда общий ущерб при столкновении по формуле (9) составляет

$$\bar{C}_{cm} = \bar{C}_1 + \bar{C}_2 = 488 + 1158 = 1646 \text{ тыс. руб.}$$

Согласно данным из системы АСРБ за 2013-2015 годы произошло 17 взрывов с ущербом, приведенным в таблице 5.

По формуле (10) получаем

$$\bar{C}_{вз} = \frac{\sum_{i=1}^{17} C_{вз}^i}{17} = 78 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица 4. Размер ущерба от столкновений в тыс. руб. (по каждому происшествию)

207,67	19,56	440	156,81	65,17	21,8	76,7	54,1	35,05	445,92
61,31	5,11	1717	149,75	378	65,12	14,46	422,28	74,5	2264,62
226,3	1,3	326,7	645,25	57,86	1067,27	43,64	0,2	3,63	226,28
4,5	1,02	1082,27	1	1,35	21	195,75	923,35	1	2,45
9,44	11,4	800	41,06	2	2,04	4,49	173	19,35	9,9
66,9	393,4	0,9	2332,72	115,87	5,9	5,9	263	85,7	1612
22	42,7	654,38	51139						

Таблица 5. Размер ущерба от взрывов в тыс. руб. (по каждому происшествию)

8,49	110,88	49,04	1	18,78	102,39	64,39	85,3	21,61	174,11
4,25	389,48	132,01	91,01	2,57	72,04	0,35			

Таблица 6. Размер ущерба от сходов в тыс. руб. (по каждому происшествию)

79	14,8	422,3	158,03	7,66	28,83	3	215	503,67	9,13
328,07	3,86	133,18	3	20,31	573,44	363,42	263,69	261,9	251,7
247,26	27,05	34	180,75	219,6	322,76	262,5	5123,35	266,45	2027,08
59,75	281,74	228,38	193,5	474,3	75,5	33,93	52,9	82,35	38,96
29,13	1,44	68,07	1,38	1	150,62	970,07	33,3	15	117,3
3,2	375,95	200	192,82	45,64	45,3	349,47	28,31	78,9	33,3
579,26	338,46	479,17	13	43,37	152	525,22	920,84	203,77	2411,23
2	88,52	109,31	408,65	1007,25	1,99	10	608,29	137,7	113,24
7	16,63	11,7	102,78	15	15,89	23,6	25	18,97	34
48,74	48,69	2	15	309,05	223,68	66,28	993,66	42,76	30
155,06	163,25	56,06	43,48	73,67	19,28	36,6	67,9	46	112
71,65	149,05	76,7	33,13	12,34	491,8	1460	32,25	220,61	3,2
9,37	19,2	118,53	703,44	72	124,52	7,73	146,78	188,04	150,47
142,3	179,12	306,86	3,6	717,69	29,5	149,7	254,01	94,77	2
34	309,21	116	10	30	93,9	110	40,77	103,85	1147,05
483,05	89,73	12	340	34	420,16	3,6	24	6,49	139,53
899,9	1	31,67	55,27	22,2	106,76	1,68	129,9	118,61	160
150,8	256,63	374,41	29,62	74,8	98,21	20	292,99	80,46	162,72
1446	544,06	37,56	1610,54	55,1	79,77	101	93,46	125	260,3
3,1	46	773,55	24,5	27,03	203	13,92	655,1	72,49	216
303,89	24,47	58,49	256	447,55	41,43	37,9	8,3	247,99	0,52
704,67	26,5	80,74	494,73	174,99	16,15	58,89	154,81	8,56	17,79
62,82									

По данным из системы АСРБ за 2013-2015 годы произошел 221 взрез с последующим сходом с ущербом, приведенным в таблице 6.

По формуле (11) получаем

$$\bar{C}_{cx} = \frac{\sum_{i=1}^{221} C_{cx}^i}{221} = 225 \text{ тыс. руб.}$$

Пусть, как и в работе [2], на станции работают два локомотива, каждый из которых в среднем за час пере-

секает 36 стрелок, а вероятность проезда запрещающего сигнала маневровым составом равна $P_m = 1,4 \cdot 10^{-4}$, вероятность взреза стрелки равна вероятности схода с рельсов после взреза $P_{cx} = P_{вз} = 0,1$, тогда вероятность взреза стрелки с последующим сходом с рельсов вычисляется по формуле (3)

$$P_{вз(со сходом)} = P_m \cdot P_{вз} \cdot P_{cx} = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot 0,1 = 1,4 \cdot 10^{-6},$$

а вероятность взреза стрелки без последующего схода вычисляется по формуле (4)

$$P_{\text{вз(без схода)}} = P_{\text{м}} P_{\text{вз}} (1 - P_{\text{сх}}) = \\ = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot (1 - 0,1) = 1,26 \cdot 10^{-5}.$$

Общее количество стрелок, проезжаемых маневровыми составами за год, вычисляется по формуле (2)

$$N_{\text{год}} = 365 \cdot 24 \cdot \sum_{l=1}^L N_l = 365 \cdot 24 \cdot (36 + 36) = 630720.$$

Следовательно, среднее количество взрезанных стрелок по формуле (5) составляет

$$\bar{N}_{\text{год}}^{\text{вз}} = N_{\text{год}} \cdot P_{\text{вз(без схода)}} = 630720 \cdot 1,26 \cdot 10^{-5} = 7,947,$$

а среднее количество взрезанных стрелок с последующим сходом по формуле (6) равно

$$\bar{N}_{\text{год}}^{\text{сх}} = N_{\text{год}} \cdot P_{\text{вз(со сходом)}} = 630720 \cdot 1,4 \cdot 10^{-6} = 0,883.$$

Пусть также при помощи формулы (1) получено, что

$$P(A_{\text{год}}) = 0,3.$$

Найдем количественные значения рисков от всех неблагоприятных событий и соответствующие им зоны риска.

Риск от столкновений вычисляется по формуле (12) и составляет

$$R_{\text{ст}} = P(A_{\text{год}}) \cdot \bar{C}_{\text{ст}} = 0,3 \cdot 1646 = 493,8 \text{ тыс. руб.}$$

При этом попадаем в оранжевую зону – зону нежелательного риска. Следовательно, необходимо принимать меры по уменьшению риска. В качестве такой меры можно предложить установку на станции системы Маневровой Автоматической Локомотивной Сигнализации (МАЛС).

Риски от взрезов и сходов вычисляются по формуле (13) и (14)

$$R_{\text{вз}} = \bar{N}_{\text{год}}^{\text{вз}} \cdot \bar{C}_{\text{вз}} = 7,947 \cdot 78 = 620 \text{ тыс. руб.},$$

$$R_{\text{сх}} = \bar{N}_{\text{год}}^{\text{сх}} \cdot \bar{C}_{\text{сх}} = 0,883 \cdot 225 = 199 \text{ тыс. руб.}$$

При этом попадаем в зеленую зону – зону не принимаемого в расчет риска. Следовательно, на данной станции никаких мер по снижению риска от взрезов и сходов проводить не надо. Отметим, что риск от взрезов оказывается больше, чем риск от столкновений. Тем не менее, меры по снижению риска столкновения проводить необходимо, а по снижению риска взрезов – нет. Это обстоятельство связано с тем, что при столкновении ОАО «РЖД» несет дополнительные репутационные издержки, усугубляющиеся тем фактом, что столкновение происходит на станции с большим количеством людей.

Заключение

В работе исследована проблема расчета риска неблагоприятных событий, вызванных проездом пассажирским поездом или маневровым составом за-

прещающего сигнала светофора. Приведены формулы расчета вероятности хотя бы одного столкновения на станции пассажирского поезда за год, среднего количества взрезанных стрелок маневровым составом без последующего схода, среднее число сходов с рельсов за год. Приведены формулы по расчету среднего ущерба от неблагоприятных событий. Построены матрицы рисков для всех неблагоприятных событий. Приведен пример использования полученных результатов, основанный на гипотетических данных и экспертных оценках.

Библиографический список

- ГОСТ Р 54505-2011 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте».
- Игнатов А.Н., Кибзун А.И., Платонов Е.Н. Оценка вероятности столкновения железнодорожных составов на железнодорожных станциях на основе пуассоновской модели // Автоматика и телемеханика, 2016. №11. (принята к публикации).
- Кибзун А.И., Горяинова Е.Р., Наумов А.В. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
- Статья 1 Федерального закона от 14.12.2015 N 376-ФЗ.
- Новожилов Е.О. Принципы построения матрицы рисков // Надежность. 2015. № 3(54), с. 73-86.

Сведения об авторах

Игорь Б. Шубинский, доктор технических наук, профессор, директор ЗАО «ИБ Транс», Москва, Россия, тел. +7 (495) 786-68-57, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

Алексей М. Замышляев, доктор технических наук, заместитель Генерального директора ОАО «НИИ-АС», Москва, Россия, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: A.Zamyshlyayev@vniias.ru

Алексей Н. Игнатов, аспирант, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, тел. +7 906 059 50 00, alexei.ignatov1@gmail.com

Юрий С. Кан, доктор физико-математических наук, профессор, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: yu_kan@mail.ru

Андрей И. Кибзун, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: kibzun@mail.ru

Евгений Н. Платонов, кандидат физико-математических наук, доцент, Московский Авиационный институт, Москва, Россия, e-mail: en.platonov@gmail.com

Поступила 02.02.2016