

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Н. Игнатов, А. И. Кибзун, Е. Н. Платонов, Оценка вероятности столкновения составов на железнодорожных станциях на основе пуассоновской модели, *Автомат. и телемех.*, 2016, выпуск 11, 43–59

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением  
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.135.216.29

20 ноября 2024 г., 02:05:07



© 2016 г. А.Н. ИГНАТОВ (alexei.ignatov1@gmail.com),  
А.И. КИБЗУН, д-р физ.-мат. наук (kibzun@mail.ru),  
Е.Н. ПЛАТОНОВ, канд. физ.-мат. наук (en.platonov@gmail.com)  
(Московский авиационный институт)

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ СОСТАВОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЯХ НА ОСНОВЕ ПУАССОНОВСКОЙ МОДЕЛИ<sup>1</sup>

Рассмотрена задача оценки вероятности столкновения маневровых составов с пассажирскими поездами на железнодорожной станции. Поток маневровых составов предполагается пуассоновским для каждого стрелочного перевода, на котором возможны боковые столкновения. Исходными данными для расчета служат топология станции, расписание движения пассажирских поездов и возможные маршруты их следования через станцию, а также интенсивности движения маневровых составов через неизолированные стрелочные переводы, на которых возможны столкновения, а также средние значения длин составов и скоростей их движения. Предлагаемую математическую модель движения составов можно рассматривать как первое приближение при моделировании процесса столкновения составов на железнодорожной станции. Рассматривается содержательный пример.

### 1. Введение

В связи с актуальностью проблемы снижения риска транспортных происшествий в настоящее время наблюдается возрастание требований к безопасности движения, в том числе на железных дорогах. Транспортные происшествия на железнодорожном транспорте относятся к категории происшествий, способных привести к крупным катастрофам не только из-за возможных человеческих жертв среди пассажиров поездов, но и ввиду перевозки больших объемов опасных грузов, например нефтепродуктов, возгорание которых в результате столкновения может привести к катастрофам в пределах крупного населенного пункта. Столкновение движущихся поездов наиболее вероятно на крупных железнодорожных станциях, где интенсивность движения наиболее высока. С одной стороны, через них проходят потоки пассажирских поездов, следующих в соответствии со своим расписанием движения. С другой стороны, высока интенсивность маневровых работ, связанных с формированием и расформированием составов, перестановкой составов или групп вагонов из парка в парк или с одного пути на другой, прицепкой и отцепкой вагонов. При этом машинист маневрового локомотива, выполняющий такие работы, не привязан к какому-либо графику своего движения на станции, а выбирает маршрут своего следования в каждый момент времени самостоятельно с учетом выполняемой задачи и показаний световых сигналов све-

---

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

тофоров. Таким образом, на железнодорожной станции имеется некоторый конфликт интересов между проходящими через станцию пассажирскими или грузовыми поездами и маневровыми составами. Эта конфликтность может привести к различным транспортным происшествиям, среди которых наиболее часто встречаются и представляют значительную опасность боковые столкновения на стрелочных переводах.

Согласно [1] основной задачей управления рисками на железнодорожном транспорте является достижение и поддержание допустимого уровня риска при обеспечении функциональной безопасности объектов инфраструктуры и подвижного состава, в том числе снижение вероятности возникновения транспортных происшествий.

Самой опасной по возможным последствиям инфраструктурой в составе железных дорог являются станции, на которых движение поездов является наиболее сложным и интенсивным. Топология станции бывает весьма сложной, а изменение этой топологии зачастую сопряжено с массой ограничений, поскольку многие крупные станции расположены в черте города. Такое расположение железнодорожных станций — дополнительный фактор, приводящий к серьезным последствиям от столкновения составов. Для снижения риска аварий на железнодорожном транспорте необходимо, в первую очередь, добиться минимизации вероятности столкновений подвижного состава на железнодорожных станциях.

Вероятностный подход к решению проблем обеспечения безопасности различных технических систем развивается в [2–13]. В частности, в [2] рассматриваются факторы, влияющие на вероятность столкновения поездов, следующих по параллельным железнодорожным веткам. Работы [3, 4] посвящены анализу вероятности столкновений на автомобильных переездах через железные дороги. Суть вероятностной концепции составляют: количественная оценка степени опасности (риска), применение имитационного моделирования для выявления возможных путей снижения риска, установление приемлемых уровней риска.

В настоящей статье предлагается алгоритм оценки вероятности бокового столкновения поезда с маневровым составом на железнодорожной станции в течение заданного периода времени. Поток маневровых составов через каждый стрелочный перевод предполагается пуассоновским.

В зависимости от смены и времени суток характеристики потока передвижения маневровых составов через стрелки могут измениться, однако, для простоты изложения интенсивность в любой момент времени полагается одинаковой. При этом в модели имеется возможность задания уникальных для каждого часа интенсивностей передвижений через стрелки. Предполагается, что разрешено проведение маневровых работ в районе приемки/отправки пассажирского поезда. Само столкновение возникает лишь при проезде машинистом поезда или машинистом маневрового локомотива на запрещающий сигнал светофора. Такой проезд считается случайным и происходит с малой заданной вероятностью. Движение пассажирских поездов подчиняется заданному расписанию, но при проезде станции каждый пассажирский поезд может проследовать по одному из заданных маршрутов. Для каждого поезда

и для каждого маршрута ниже определяется вероятность столкновения с маневровым составом. Это позволяет оптимизировать маршрут с точки зрения снижения указанной вероятности. Для расчета вероятности столкновения на конкретном стрелочном переводе используются средние значения скорости и длины. Однако используя разрешенные минимальные или максимальные значения скоростей и длин составов, можно получить другие значения вероятности, которые можно трактовать как границы изменения вероятности столкновения на конкретном стрелочном переводе. Возможности разработанной модели иллюстрируются на содержательном примере. Более детальный анализ практических результатов использования предложенной модели приведен в [14].

## 2. Постановка задачи

Каждый поезд, например пассажирский, проезжая по конкретному маршруту по станции, пересекает несколько стрелочных переводов как изолированных, так и неизолированных. Изолированным стрелочным переводом называется тот, на котором столкновение, вызванное проездом на светофор с запрещающим сигналом, невозможно; неизолированным стрелочным переводом называется тот, на котором столкновение возможно. Зафиксируем произвольный маршрут и рассмотрим на нем какой-нибудь неизолированный стрелочный перевод. Для него введем обозначения:

$\lambda_m$  — интенсивность следования маневровых составов, [1/ч];

$\lambda_c$  — интенсивность останавливающихся на стрелочном переводе маневровых составов, [1/ч];

$l_{п}$  — средняя длина пассажирского поезда, [км];

$l_m$  — средняя длина маневрового состава, [км];

$l_t$  — средняя длина локомотива (вагона) маневрового состава, [км];

$v_{п}$  — средняя скорость пассажирского поезда, [км/ч];

$v_m$  — средняя скорость маневрового состава, [км/ч];

$\tau_c$  — среднее время нахождения маневрового состава на стрелочном переводе при условии остановки на нем, [ч];

$\tau_{пс}$  — среднее время стоянки пассажирского поезда на стрелочном переводе, [ч];

$P_{пс}$  — вероятность остановки пассажирского поезда на стрелочном переводе;

$P_{п}$  — вероятность проезда на запрещающий сигнал пассажирским поездом;

$P_m$  — вероятность проезда на запрещающий сигнал маневровым составом.

Будем считать, что проезд маневровых локомотивов через стрелки образует поток случайных событий, являющийся пуассоновским. Также предположим, что стоящие на стрелках составы образуют пуассоновский поток событий. Для того чтобы эти предположения были справедливы, необходимо выполнение свойств стационарности (однородности), ординарности и независимости. Можно говорить о том, что рассматриваемые потоки стационарны, поскольку их интенсивность является постоянной. Отказ от стационарности неоправданно усложняет модель и требует сбора более подробной первичной информации о маневровых работах на станции. Свойство ординарности вы-

полнено, так как события в потоке следуют строго один за другим и не происходят вместе. Например, одновременное появление двух маневровых составов на одном стрелочном переводе с одного направления невозможно. Предположение о независимости событий из потока также является оправданным, поскольку возникновение двух событий из потока вызвано не связанными между собой причинами.

Однако введенные предположения о пуассоновских потоках событий верны только до первого столкновения составов на станции. Из-за столкновения составов движение на станции может быть вообще прекращено или прекращено на какой-то части путей или перегонов. Как именно произошедшее столкновение повлияет на интенсивность и характер движения на станции, предсказать практически невозможно. Поэтому дальнейшие расчеты вероятности столкновения верны только до первого столкновения и после возобновления нормальной работы станции, т.е. после устранения всех последствий произошедшего столкновения.

При расчете вероятности столкновения будем использовать только средние величины, а не законы распределения таких величин, как длина состава, скорость движения, время стоянки. Это вызвано тем, что на практике непосредственные наблюдения за этими величинами для каждого стрелочного перевода почти недоступны. Хотя разрозненные наблюдения свидетельствуют о том, что, по-видимому, законы распределения длин составов и их скоростей движения являются нормальными. Но для корректной проверки данного предположения имеющейся статистики оказывается недостаточно.

Сделанные предположения можно рассматривать как способ построения простой модели движения составов, которую можно будет в дальнейшем уточнять по мере накопления статистической информации.

Требуется определить вероятность  $P(A)$  столкновения пассажирского поезда и маневрового состава на этом стрелочном переводе.

Рассмотрим следующие события:

$A_M$  — столкновение на неизолированном стрелочном переводе, произошедшее по вине машиниста маневрового локомотива, проехавшего светофор с запрещающим сигналом;

$A_n$  — столкновение на неизолированном стрелочном переводе, произошедшее по вине машиниста пассажирского поезда, проехавшего на запрещающий сигнал;

$A_{nc}$  — столкновение на неизолированном стрелочном переводе, произошедшее по вине машиниста маневрового состава, проехавшего на запрещающий сигнал и столкнувшегося со стоящими на стрелочном переводе вагонами пассажирского поезда;

$A_{mc}$  — столкновение на неизолированном стрелочном переводе, произошедшее по вине машиниста пассажирского поезда, проехавшего на запрещающий сигнал и столкнувшегося со стоящими на стрелочном переводе вагонами;

$A_{тп}$  — столкновение на неизолированном стрелочном переводе, произошедшее при проезде и маневровым составом, и пассажирским поездом запрещающего сигнала светофора.

Тогда вероятность столкновения пассажирского поезда и маневрового состава на неизолированном стрелочном переводе можно найти по формуле

$$(1) \quad \begin{aligned} P(A) &= P(A_M + A_{\Pi} + A_{\text{пс}} + A_{\text{мс}} + A_{\text{тп}}) \approx \\ &\approx P(A_M) + P(A_{\Pi}) + P(A_{\text{пс}}) + P(A_{\text{мс}}) + P(A_{\text{тп}}), \end{aligned}$$

так как вероятность попарных произведений этих событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью самих событий.

Найдем вероятности событий, составляющих вероятность бокового столкновения.

### 3. Вероятность столкновения, произошедшего по вине машиниста пассажирского поезда, проехавшего светофор с запрещающим сигналом

Рассмотрим два возможных события. Пусть  $A_{\Pi(\Pi \rightarrow M)}$  — событие, состоящее в том, что пассажирский поезд проехал светофор с запрещающим сигналом и локомотив пассажирского поезда столкнулся с маневровым составом, когда тот проезжал неизолированный стрелочный перевод, а  $A_{\Pi(M \rightarrow \Pi)}$  — событие, состоящее в том, что пассажирский поезд проехал светофор с запрещающим сигналом и произошло столкновение маневрового состава с пассажирским поездом на неизолированном стрелочном переводе. Поскольку события  $A_{\Pi(\Pi \rightarrow M)}$ ,  $A_{\Pi(M \rightarrow \Pi)}$  являются несовместными, то

$$(2) \quad P(A_{\Pi}) = P(A_{\Pi(\Pi \rightarrow M)}) + P(A_{\Pi(M \rightarrow \Pi)}).$$

Найдем вначале  $P(A_{\Pi(\Pi \rightarrow M)})$ . Пусть пассажирский поезд стоит перед стрелочным переводом. Тогда после начала движения поезда может произойти столкновение только с одним маневровым составом.

Пусть пассажирский поезд в начальный (нулевой) момент времени находится перед рассматриваемым стрелочным переводом, на котором он оказывается через некоторое время  $\tau$ . Тогда

$$P(A_{\Pi(\Pi \rightarrow M)}) = P(B_1 C_1),$$

где событие  $B_1$  означает, что в момент  $\tau$  машинист пассажирского состава проехал светофор с запрещающим сигналом, а событие  $C_1$  — на стрелочном переводе в это время находится маневровый состав. Поскольку проезд машинистом пассажирского поезда запрещающего сигнала и проведение маневровых работ на стрелочном переводе независимы, то и события  $B_1$  и  $C_1$  независимы. По этой причине

$$P(A_{\Pi(\Pi \rightarrow M)}) = P(B_1 C_1) = P(B_1)P(C_1).$$

Машинист пассажирского поезда проезжает на запрещающий сигнал светофора с вероятностью  $P_{\Pi}$ , поэтому  $P(B_1) = P_{\Pi}$ . Для того чтобы маневровый состав находился на стрелочном переводе в тот самый момент, когда машинист пассажирского поезда проезжает на запрещающий сигнал, он должен появиться на нем в любой момент времени от  $\tau - l_M/v_M$  до  $\tau$ , т.е. за время

$$\Delta = \tau - (\tau - l_M/v_M) = l_M/v_M.$$

По условию поток проезда маневровых составов через стрелки является пуассоновским с интенсивностью  $\lambda_M$ . Поэтому вероятность события  $C_1$  вычисляется по формуле

$$P(C_1) = \lambda_M \Delta \exp\{-\lambda_M \Delta\} = \lambda_M \frac{l_M}{v_M} \exp\left\{-\lambda_M \frac{l_M}{v_M}\right\} \approx \lambda_M \frac{l_M}{v_M}.$$

Учитывая сказанное выше, получаем

$$(3) \quad P(A_{\Pi(\Pi \rightarrow M)}) \approx P_{\Pi} \lambda_M \frac{l_M}{v_M}.$$

Найдем теперь  $P(A_{\Pi(M \rightarrow \Pi)})$ . Пусть по-прежнему пассажирский состав находится перед стрелочным переводом в начальный момент времени. Тогда вероятность события  $P(A_{\Pi(M \rightarrow \Pi)})$  вычисляется по формуле

$$P(A_{\Pi(M \rightarrow \Pi)}) = P(B_1 C_2),$$

где событие  $C_2$  означает, что за время проезда пассажирским поездом стрелочного перевода появится хотя бы один маневровый состав. Используя определение условной вероятности, получаем

$$P(A_{\Pi(M \rightarrow \Pi)}) = P(B_1 C_2) = P(B_1)P(C_2|B_1),$$

где  $P(C_2|B_1)$  — вероятность того, что на стрелочном переводе появится хотя бы один маневровый состав за время проезда этой стрелки пассажирским поездом, который находится на стрелке, проехав на запрещающий сигнал светофора. Эту вероятность можно вычислить, зная, насколько часто машинист маневрового локомотива успевает затормозить перед стрелочным переводом, видя пассажирский состав. Для простоты предположим, что экстренное торможение не помогает избежать столкновения в силу возникновения пассажирского поезда прямо перед маневровой группой, тогда события  $B_1$  и  $C_2$  независимы и

$$P(A_{\Pi(M \rightarrow \Pi)}) = P(B_1 C_2) = P(B_1)P(C_2).$$

Пассажирский поезд проезжает светофор с запрещающим сигналом с вероятностью  $P_{\Pi}$ , поэтому  $P(B_1) = P_{\Pi}$ . Отметим, что пассажирский поезд проезжает стрелочный перевод с момента времени  $\tau$  до момента времени  $\tau + l_{\Pi}/v_{\Pi}$ . Поскольку время проезда пассажирским поездом через стрелочный перевод равно

$$\Delta = \tau + l_{\Pi}/v_{\Pi} - \tau = l_{\Pi}/v_{\Pi},$$

то в силу пуассоновости потока маневровых составов вероятность события  $C_2$  вычисляется по формуле

$$P(C_2) = 1 - \exp\{-\lambda_M \Delta\} \approx \lambda_M \Delta = \lambda_M \frac{l_{\Pi}}{v_{\Pi}}.$$

Отсюда получаем

$$(4) \quad P(A_{\Pi(M \rightarrow \Pi)}) \approx P_{\Pi} \lambda_M \frac{l_{\Pi}}{v_{\Pi}}.$$

Учитывая (2)–(4), получаем

$$(5) \quad \begin{aligned} P(A_{\Pi}) &= P(A_{\Pi(\Pi \rightarrow M)}) + P(A_{\Pi(M \rightarrow \Pi)}) \approx \\ &\approx P_{\Pi} \lambda_M \frac{l_M}{v_M} + P_{\Pi} \lambda_M \frac{l_{\Pi}}{v_{\Pi}} = P_{\Pi} \lambda_M \left( \frac{l_M}{v_M} + \frac{l_{\Pi}}{v_{\Pi}} \right). \end{aligned}$$

#### 4. Вероятность столкновения по вине машиниста маневрового состава, проехавшего светофор с запрещающим сигналом

Рассмотрим следующие два события:

$A_{M(M \rightarrow \Pi)}$  — событие, состоящее в том, что маневровый состав проехал светофор с запрещающим сигналом и произошло столкновение маневрового локомотива с пассажирским поездом, проезжающим неизолированный стрелочный перевод;

$A_{M(\Pi \rightarrow M)}$  — событие, состоящее в том, что маневровый состав проехал светофор с запрещающим сигналом и произошло столкновение локомотива пассажирского поезда с маневровым составом на неизолированном стрелочном переводе.

Поскольку события  $A_{M(M \rightarrow \Pi)}$ ,  $A_{M(\Pi \rightarrow M)}$  являются попарно несовместными, то

$$(6) \quad P(A_M) = P(A_{M(M \rightarrow \Pi)}) + P(A_{M(\Pi \rightarrow M)}).$$

Найдем  $P(A_{M(M \rightarrow \Pi)})$ . Поскольку вероятность проезда машинистом маневрового состава светофора с запрещающим сигналом составляет  $P_M$ , то маневровые составы, проезжающие светофор с запрещающим сигналом, образуют поток событий, являющийся пуассоновским с интенсивностью  $\lambda_M P_M$ . В силу того, что пассажирский поезд находится на стрелочном переводе с момента времени  $\tau$  до момента времени  $\tau + l_{\Pi}/v_{\Pi}$ , т.е. в течение времени

$$\Delta = \tau + l_{\Pi}/v_{\Pi} - \tau = l_{\Pi}/v_{\Pi},$$

событие  $A_{M(M \rightarrow \Pi)}$  означает, что за время  $\Delta$  на стрелочном переводе должен появиться хотя бы один маневровый состав из потока маневровых составов, проезжающих светофор с запрещающим сигналом. Поэтому

$$(7) \quad P(A_{M(M \rightarrow \Pi)}) = 1 - \exp\{-\lambda_M P_M \Delta\} \approx \lambda_M P_M \Delta = \lambda_M P_M \frac{l_{\Pi}}{v_{\Pi}}.$$

Найдем  $P(A_{M(\Pi \rightarrow M)})$ . Поскольку для искомого события маневровый состав должен находиться в момент времени  $\tau$  на стрелочном переводе, то он должен появиться на стрелочном переводе с момента времени  $\tau - l_M/v_M$  до  $\tau$ , т.е. в течение времени

$$\Delta = \tau - (\tau - l_M/v_M) = l_M/v_M.$$



Так как маневровый состав при этом должен быть из потока составов, проезжающих светофор с запрещающим сигналом, то вероятность события  $A_{M(M \rightarrow \Pi)}$  вычисляется по формуле

$$(8) \quad P(A_{M(\Pi \rightarrow M)}) = \lambda_M P_M \Delta \exp\{-\lambda_M P_M \Delta\} \approx \lambda_M P_M \Delta = \lambda_M P_M \frac{l_M}{v_M},$$

в предположении, что машинист пассажирского поезда может отвлекаться и не заметить препятствие, мешающее движению, если ему горит разрешающий сигнал светофора.

С учетом (6)–(8) получаем

$$(9) \quad \begin{aligned} P(A_M) &= P(A_{M(M \rightarrow \Pi)}) + P(A_{M(\Pi \rightarrow M)}) \approx \\ &\approx \lambda_M P_M \frac{l_\Pi}{v_\Pi} + \lambda_M P_M \frac{l_M}{v_M} = \lambda_M P_M \left( \frac{l_\Pi}{v_\Pi} + \frac{l_M}{v_M} \right). \end{aligned}$$

### 5. Вероятность столкновения маневрового состава со стоящими на стрелочном переводе вагонами пассажирского поезда

Пусть пассажирский поезд находится перед стрелочным переводом в момент времени  $\tau$ , а до времени остановки пройдет еще время  $\delta$ . Тогда

$$P(A_{\text{пс}}) = P(B_2 C_3),$$

где  $B_2$  — событие, заключающееся в том, что пассажирский поезд остановился на рассматриваемой стрелке, а  $C_3$  — событие, заключающееся в том, что какой-то маневровый состав, проехал светофор с запрещающим сигналом, когда стрелочный перевод занят пассажирским составом. Очевидно, что события  $B_2$  и  $C_3$  независимы, поэтому

$$P(A_{\text{пс}}) = P(B_2 C_3) = P(B_2)P(C_3).$$

Поскольку вероятность остановки пассажирского поезда на стрелке составляет  $P_{\text{пс}}$ , то  $P(B_2) = P_{\text{пс}}$ . Вероятность проезда машинистом маневрового состава светофора с запрещающим сигналом составляет  $P_M$ , поэтому маневровые составы, проезжающие светофор с запрещающим сигналом, образуют поток событий, являющийся пуассоновским с интенсивностью  $\lambda_M P_M$ . Пассажирский поезд стоит на стрелочном переводе с момента времени  $\tau + \delta$  до момента времени  $\tau + \delta + \tau_{\text{пс}}$ . Поэтому для того, чтобы событие  $C_3$  произошло, за общее время стоянки

$$\Delta = \tau + \delta + \tau_{\text{пс}} - (\tau + \delta) = \tau_{\text{пс}}$$

на данном стрелочном переводе должен появиться хотя бы один маневровый состав. Отсюда вероятность события  $C_3$  вычисляется по формуле

$$P(C_3) = 1 - \exp\{-\lambda_M P_M \Delta\} \approx \lambda_M P_M \Delta = \lambda_M P_M \tau_{\text{пс}}.$$

Таким образом, получаем

$$(10) \quad P(A_{\text{пс}}) = P(B_2 C_3) = P(B_2)P(C_3) \approx \lambda_M P_M P_{\text{пс}} \tau_{\text{пс}}.$$

## 6. Вероятность столкновения пассажирского поезда со стоящими на стрелочном переводе вагонами

Так как поток событий, связанных со стоящими вагонами, является пуассоновским с интенсивностью  $\lambda_c$ , а  $\tau_c$  — среднее время нахождения вагонов на стрелочном переводе, то вероятность  $P(A_{mc})$  того, что пассажирский поезд столкнется со стоящими на стрелочном переводе вагонами составляет

$$P(A_{mc}) = P(B_1 C_4),$$

где событие  $C_4$  означает, что вагоны находятся на стрелочном переводе в момент времени  $\tau$ . Поскольку очевидно, что события  $B_1$  и  $C_4$  независимы, то

$$P(A_{mc}) = P(B_1 C_4) = P(B_1)P(C_4).$$

Как и ранее, вероятность проезда пассажирским поездом светофора с запрещающим сигналом составляет  $P_{\Pi}$ , поэтому  $P(B_1) = P_{\Pi}$ . Событие  $C_4$  может произойти только в случае, если вагоны появились на стрелочном переводе с момента времени  $\tau - \tau_c$  до момента времени  $\tau$ , т.е. за промежуток времени  $\Delta$  длиной

$$\Delta = \tau - (\tau - \tau_c) = \tau_c.$$

Отсюда

$$P(C_4) = \lambda_c \Delta \exp\{-\lambda_c \Delta\} \approx \lambda_c \Delta = \lambda_c \tau_c.$$

Следовательно,

$$(11) \quad P(A_{mc}) = P(B_1)P(C_4) \approx P_{\Pi} \lambda_c \tau_c.$$

## 7. Вероятность столкновения пассажирского поезда с маневровым локомотивом, когда оба машиниста проехали на запрещающий сигнал светофора

Рассмотрим следующие два события:

$A_{\Pi\Pi(m \rightarrow \Pi)}$  — событие, состоящее в том, что и маневровый состав, и пассажирский поезд проехали светофор с запрещающим сигналом и маневровый состав столкнулся с пассажирским поездом на неизолированном стрелочном переводе;

$A_{\Pi\Pi(\Pi \rightarrow m)}$  — событие, состоящее в том, что и маневровый состав, и пассажирский поезд проехали светофор с запрещающим сигналом и пассажирский поезд столкнулся с маневровым составом на неизолированном стрелочном переводе.

Найдем  $P(A_{\Pi\Pi(m \rightarrow \Pi)})$ . Поскольку поток маневровых составов, проезжающих на запрещающий сигнал светофора является пуассоновским с интенсивностью  $\lambda_m P_m$ , а пассажирский поезд проезжает на запрещающий сигнал светофора с вероятностью  $P_{\Pi}$ , вероятность искомого столкновения равна

$$(12) \quad P(A_{\Pi\Pi(m \rightarrow \Pi)}) = P_{\Pi}(1 - \exp\{-\lambda_m P_m \Delta\}),$$

где второй сомножитель характеризует вероятность того, что за время проезда  $\Delta = l_{\Pi}/v_{\Pi}$  пассажирским поездом стрелочного перевода на стрелочном

переводе появится хотя бы один состав из потока маневровых составов, проезжающих на запрещающий сигнал светофора. Учитывая (12), получаем

$$(13) \quad P(A_{\text{ТП}(M \rightarrow \Pi)}) \approx P_{\Pi} \lambda_M P_M \Delta = \lambda_M P_M P_{\Pi} \frac{l_{\Pi}}{v_{\Pi}}.$$

Найдем  $P(A_{\text{ТП}(\Pi \rightarrow M)})$ . Для осуществления искомого события на стрелочном переводе с момента времени  $\tau - l_M/v_M$  до момента времени  $l_M/v_M$ , т.е. за время

$$\Delta = \tau - (\tau - l_M/v_M) = l_M/v_M,$$

должен появиться маневровый состав из потока маневровых составов интенсивности  $\lambda_M P_M$ , проезжающих запрещающий сигнал светофора, и при этом пассажирский поезд также должен проехать запрещающий сигнал светофора. Поэтому

$$(14) \quad P(A_{\text{ТП}(\Pi \rightarrow M)}) = P_{\Pi} \lambda_M P_M \Delta \exp\{-\lambda_M P_M \Delta\} \approx P_{\Pi} \lambda_M P_M \Delta = P_{\Pi} \lambda_M P_M \frac{l_M}{v_M}.$$

Таким образом, учитывая (13) и (14), имеем

$$(15) \quad P(A_{\text{ТП}}) \approx \lambda_M P_M P_{\Pi} \left( \frac{l_{\Pi}}{v_{\Pi}} + \frac{l_M}{v_M} \right).$$

## 8. Вероятность столкновения пассажирского поезда при движении через станцию

Согласно формулам (1), (5), (9)–(11), (15) вероятность столкновения (событие  $A$ ) на одном неизолированном стрелочном переводе оценивается величиной

$$P(A) \approx \lambda_M P_M (1 + P_{\Pi}) \left( \frac{l_{\Pi}}{v_{\Pi}} + \frac{l_M}{v_M} \right) + \lambda_c P_{\Pi} \tau_c + \lambda_M P_{\Pi} \left( \frac{l_{\Pi}}{v_{\Pi}} + \frac{l_M}{v_M} \right) + \lambda_M P_M P_{\text{пс}} \tau_{\text{пс}}.$$

Если же рассматриваемый стрелочный перевод является изолированным, то столкновение невозможно, поэтому вероятность столкновения на этом переводе равна нулю. Таким образом, вероятность столкновения  $A$  на произвольном (изолированном или неизолированном) стрелочном переводе оценивается величиной

$$(16) \quad P(A) = \left( \lambda_M \left( \frac{l_{\Pi}}{v_{\Pi}} + \frac{l_M}{v_M} \right) (P_M (1 + P_{\Pi}) + P_{\Pi}) + \lambda_c P_{\Pi} \tau_c + \lambda_M P_M P_{\text{пс}} \right) k_c,$$

где  $k_c$  принимает значение 1, если стрелочный перевод неизолированный, и 0, если изолированный.

Заметим, что пассажирский поезд, проезжая через станцию, пересекает несколько как изолированных, так и неизолированных стрелочных переводов, причем на любом из неизолированных стрелочных переводов возможно столкновение. Следовательно, помимо столкновения на одной конкретной стрелке необходимо вычислять вероятность столкновения на маршруте — по-

следовательности стрелочных переводов, пересекаемых пассажирским поездом при проезде через станцию.

Пусть у пассажирского поезда с номером  $i$  имеется  $K$  маршрутов движения через станцию. Рассмотрим произвольный  $k$ -й маршрут  $R_k$ . Пусть на этом маршруте имеется  $m$  стрелочных переводов, которым присвоены номера  $j = 1, \dots, m$  согласно порядку пересечения их пассажирским поездом. Тогда вероятность того, что с конкретным поездом на маршруте  $R_k$  произойдет столкновение, составляет

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

где  $P(A_i|R_k)$  означает вероятность столкновения поезда с номером  $i$ , пересекающего станцию по маршруту  $R_k$ , а  $P(A_{k:j})$  — вероятность столкновения поезда с номером  $i$ , пересекающего станцию по маршруту  $R_k$ , на стрелке с номером  $j$ . Эта вероятность  $P(A_{k:j})$  вычисляется по формуле (16). Отметим, что для разных поездов вероятность столкновения на одном и том же маршруте может отличаться, поскольку поезд может пересекать станцию без остановки, а может с остановкой, что влияет на среднюю скорость передвижения по станции. Аналогично, для одного и того же поезда вероятность столкновения на разных маршрутах может отличаться, поскольку на разных маршрутах может быть различное количество неизолированных стрелочных переводов, а также различная интенсивность проведения маневровых работ.

Каждый маршрут  $R_k$  может использоваться с определенной интенсивностью. Поэтому вероятность того, что прибывающий на станцию пассажирский поезд с номером  $i$  проедет по маршруту  $R_k$  составляет

$$(17) \quad P(R_k) = \frac{m_{R_k}}{n},$$

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 некоторое время наблюдения. Таким образом, вероятность того, что произойдет боковое столкновение пассажирского поезда с номером  $i$  при движении через станцию, по формуле полной вероятности составляет

$$(18) \quad P(A_i) = \sum_{k=1}^K P(A_i|R_k)P(R_k).$$

### 9. Расчет вероятности бокового столкновения на станции за некоторый промежуток времени $T$ (сутки, неделя, год)

Пусть на станции за некоторый промежуток времени  $T$  в различных направлениях следуют  $I$  поездов. Рассмотрим  $i$ -й поезд из этого набора,  $i = 1, \dots, I$ . Ему соответствует вероятность  $P(A_i)$  бокового столкновения при проезде через станцию. Тогда вероятность бокового столкновения хотя бы одного поезда из  $I$  штук составляет

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

## 10. Пример расчета вероятности столкновения составов

Применим описанную процедуру вычисления вероятности столкновения составов для конкретного примера. Рассмотрим пассажирский парк некоторой железнодорожной станции, схема расположения стрелок которого изображена на рис. 1.

В табл. 1 представлены данные, описывающие топологию станции, характеристики составов, проходящих через станцию, а также маневровые работы, проводимые на станции.

Рассмотрим некоторый пассажирский поезд, который проезжает станцию без остановки.

**Таблица 1.** Блок данных, описывающий передвижения маневрового состава

Наименование	Обозначение	Количество	Единицы измерения
Общее количество стрелок на станции	$N$	102	шт
Количество маневровых локомотивов	$L$	2	шт
Количество проезжаемых стрелок маневровой группой в час с локомотивом №1	$N_1$	36	шт
Количество проезжаемых стрелок маневровой группой в час с локомотивом №2	$N_2$	36	шт
Средняя длина маневрового локомотива	$l_M$	0,2	км
Средняя скорость движения маневрового состава по станции	$v_M$	4,2	км/ч
Вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим сигналом при работе без помощника	$P_{M(\text{один})}$	$3 \cdot 10^{-4}$	
Вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим сигналом при работе с помощником	$P_{M(\text{двое})}$	$10^{-4}$	
Вероятность комплектования локомотивной бригады машинистом и его помощником	$P_{\text{двое}}$	0,8	
Интенсивность останавливающихся на стрелочных переводах маневровых составов, не проехавших на запрещающий сигнал светофора (для каждого стрелочного перевода)	$\lambda_c^1$	0	1/ч
	$\dots$	$\dots$	$\dots$
	$\lambda_c^{102}$	0	1/ч
Среднее время нахождения на стрелочном переводе маневрового состава, не проехавшего на запрещающий сигнал светофора, при условии остановки на стрелочном переводе (для каждого стрелочного перевода)	$\tau_c^1$	0	ч
	$\dots$	$\dots$	$\dots$
	$\tau_c^{102}$	0	ч

**Таблица 2.** Блок данных, описывающий передвижение пассажирского поезда по станции

Наименование	Обозначение	Количество	Единицы измерения
Средняя длина пассажирского поезда	$l_{\text{п}}$	0,48	км
Средняя скорость движения пассажирского поезда по станции	$v_{\text{п}}$	42	км/ч
Вероятность проезда запрещающего сигнала пассажирским поездом	$P_{\text{п}}$	$10^{-7}$	
Вероятность остановки пассажирского поезда на каком-нибудь стрелочном переводе	$P_{\text{пс}}$	0	
Среднее время стоянки пассажирского поезда на каком-нибудь стрелочном переводе	$\tau_{\text{пс}}$	0	ч

Вероятности  $P_{\text{м(один)}}$ ,  $P_{\text{м(двое)}}$ ,  $P_{\text{двое}}$  задаются на основании таблицы II.5.2 «Вероятность ошибок человека-оператора» из [15]. Интенсивность пересечения маневровой группой стрелочного перевода для каждого стрелочного перевода равна

$$\tilde{\lambda}_{\text{м}} = \sum_{l=1}^L \frac{N_l}{N} = \frac{36}{102} + \frac{36}{102} \approx 0,71,$$

где  $36/102$  — интенсивность пересечения произвольной стрелки маневровой группой с локомотивом № 1 или с локомотивом № 2.

Вычислим вероятность проезда запрещающего сигнала маневровой группой, которая зависит от вероятности  $P_{\text{двое}}$  того, что в локомотиве находится машинист и его помощник, а также от вероятностей  $P_{\text{м(двое)}}$  и  $P_{\text{м(один)}}$  того, что маневровая группа пересечет стрелочный перевод на запрещающий

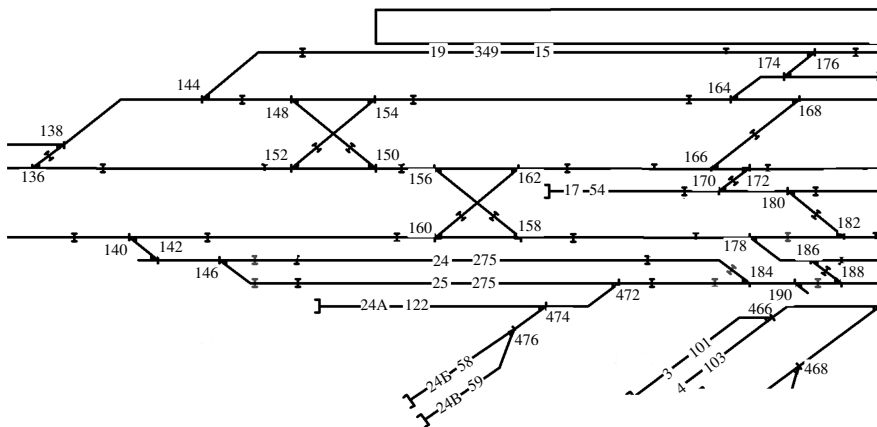


Рис. 1. Расположение стрелок.

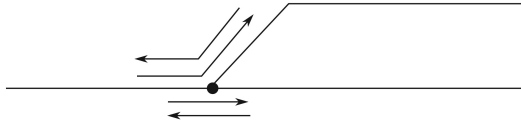


Рис. 2. Возможные направления следования (отмечены стрелочками) маневровой группы через стрелочный перевод (отмечен кружком).

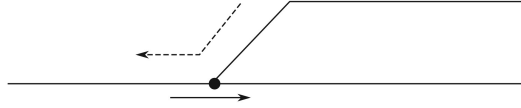


Рис. 3. Направление следования (отмечено пунктирной стрелочкой) маневровой группы через стрелочный перевод (отмечен кружком), при котором возможно столкновение с пассажирским составом, следующим в направлении, показанном сплошной стрелочкой.

сигнал светофора, когда в кабине локомотива находится машинист и его помощник и когда в кабине находится только один машинист:

$$P_M = P_{\text{двое}}P_{M(\text{двое})} + (1 - P_{\text{двое}})P_{M(\text{один})} = 0,8 \cdot 10^{-4} + (1 - 0,8) \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 1,4 \cdot 10^{-4}.$$

Известно, что рассматриваемый пассажирский поезд пропускают только по двум маршрутам, причем первый маршрут ранее использовался этим поездом 19 раз, а второй использовался 1 раз. Рассмотрим первый маршрут  $R_1$  пересечения станции пассажирским поездом, состоящий из двенадцати (№№ 1–12) стрелок, в том числе четырех (№№ 3, 4, 7, 11) неизолированных, и вычислим вероятность столкновения на этом маршруте.

Предполагая, что маневровый локомотив пересекает стрелочный перевод равновероятно в любом из возможных направлений (всего таких направлений может быть 4, см. рис. 2), интенсивность пересечения стрелки маневровой группой в некотором направлении вычисляется по формуле  $\lambda_M = \tilde{\lambda}_M/4$ .

При этом для возможного столкновения пассажирского поезда и маневрового состава последний должен проезжать стрелку лишь в одном направлении из четырех (см. рис. 3).

Вероятность столкновения на неизолированных стрелках №№ 3, 4, 7, 11 вычисляется по формуле (16):

$$P(A_{1:3}) = \lambda_M \left( \frac{l_{\text{п}}}{v_{\text{п}}} + \frac{l_{\text{м}}}{v_{\text{м}}} \right) (P_M(1 + P_{\text{п}}) + P_{\text{п}}) + \lambda_c P_{\text{п}} \tau_c + \lambda_M P_M P_{\text{пс}} = 0,178 \left( \frac{0,48}{42} + \frac{0,2}{42} \right) (1,4 \cdot 10^{-4}(1 + 10^{-7}) + 10^{-7}) = 1,5 \cdot 10^{-6}.$$

$$P(A_{1:4}) = P(A_{1:7}) = P(A_{1:11}) = 1,5 \cdot 10^{-6}.$$

Для изолированных стрелок №№ 1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 12 вероятность столкновения на них равна нулю, т.е.

$$\begin{aligned} P(A_{1:1}) &= P(A_{1:2}) = P(A_{1:5}) = P(A_{1:6}) = P(A_{1:8}) = \\ &= P(A_{1:9}) = P(A_{1:10}) = P(A_{1:12}) = 0. \end{aligned}$$

Вероятность столкновения пассажирского поезда на маршруте  $R_1$  равна

$$\begin{aligned} P(A_1|R_1) &= 0 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 1 \cdot (1 - 1,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} + \\ &+ 1 \cdot 1 \cdot (1 - 1,5 \cdot 10^{-6}) \cdot (1 - 1,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 0 + \dots \approx 6 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Рассмотрим теперь второй маршрут  $R_2$  пересечения станции пассажирским поездом, состоящий из четырнадцати (№№ 1–14) стрелок, в том числе пяти (№№ 3, 4, 7, 11, 13) неизолированных.

Вероятность столкновения на неизолированных стрелках №№ 3, 4, 7, 11, 13 вычисляется по формуле (16) и равна

$$P(A_{1:3}) = P(A_{1:4}) = P(A_{1:7}) = P(A_{1:11}) = P(A_{1:13}) = 1,5 \cdot 10^{-6}.$$

Для изолированных стрелок №№ 1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 14 вероятность столкновения на них равна нулю

$$\begin{aligned} P(A_{1:1}) &= P(A_{1:2}) = P(A_{1:5}) = P(A_{1:6}) = P(A_{1:8}) = P(A_{1:9}) = P(A_{1:10}) = \\ &= P(A_{1:12}) = P(A_{1:14}) = 0. \end{aligned}$$

Вероятность столкновения пассажирского поезда на маршруте  $R_2$ , таким образом, составляет

$$\begin{aligned} P(A_1|R_2) &= 0 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 1 \cdot (1 - 1,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} + \\ &+ 1 \cdot 1 \cdot (1 - 1,5 \cdot 10^{-6}) \cdot (1 - 1,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 0 + \dots \approx 7,5 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Из соотношения (17) получаем, что вероятность использования маршрута  $R_1$  равна

$$P(R_1) = \frac{19}{19+1} = \frac{19}{20},$$

а вероятность использования маршрута  $R_2$  равна

$$P(R_2) = \frac{1}{19+1} = \frac{1}{20}.$$

Таким образом, вероятность столкновения пассажирского поезда при пересечении станции по формуле (18) равна

$$\begin{aligned} P(A_1) &= P(A_1|R_1)P(R_1) + P(A_1|R_2)P(R_2) = \\ &= 6 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{19}{20} + 7,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{20} \approx 6,08 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$



Заметим, что полученная вероятность примерно равна вероятности катастрофы летательного аппарата по какой-либо причине, связанной с летной годностью [16], и представляет собой небольшое число.

Предположим, что рассматриваемый поезд — электричка, которая пересекает в течение дня станцию 2 раза в одном направлении и 2 раза в противоположном, а другие пассажирские поезда данную станцию не пересекают. Тогда вероятность хотя бы одного столкновения пассажирского поезда на станции за год равна

$$P(A_{\text{год}}) = 1 - (1 - 6,08 \cdot 10^{-6})^{365 \cdot 4} \approx 0,0088.$$

Отметим, что через крупные реальные станции за сутки, как правило, проходит большее количество поездов нежели 4, рассматриваемые в примере. В частности, через станцию Челябинск-Главный проходит порядка 60–70 пассажирских поездов в сутки. Следовательно, вероятность хотя бы одного столкновения за год окажется примерно в 15–20 раз больше полученной величины при заданной интенсивности маневровых работ. Данные цифры показывают, что, несмотря на кажущуюся малость вероятности столкновения поезда при проезде через станцию, вероятность хотя бы одного столкновения за год может оказаться очень существенной.

## 11. Заключение

Предложенная процедура позволяет оценить величину вероятности столкновения маневровых и пассажирских составов для различных промежутков времени и различных маршрутов следования пассажирских поездов через станцию. В основу процедуры положена пуассоновская модель для потока маневровых составов. В этой модели в качестве первого приближения используются средние значения таких случайных величин, как длины составов и скорости их движения. С помощью предложенной процедуры можно учесть влияние на вероятность столкновения изменения интенсивности движения маневровых составов. В дальнейшем процедура может быть использована для принятия управленческих решений. В частности, с помощью построения матриц риска, характеризующих средний ущерб от столкновений составов, можно спроектировать оптимальную топологию станции. Кроме того, эту процедуру можно использовать при оценке вероятности столкновения при установке на маневровые локомотивы системы маневровой автоматической локомотивной сигнализации, предназначенной для обеспечения безопасности проведения маневровых работ на железнодорожных станциях и запрета движения локомотива со скоростью выше допустимой, а также для автоматической его остановки перед закрытым сигналом или местом проведения маневровых работ. Предложенную процедуру можно распространить на случай столкновения грузовых поездов с маневровыми составами, используя вместо расписания пассажирских поездов расписание грузовых поездов, а вместо скорости и длины пассажирского поезда соответствующие характеристики грузового поезда.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54505-2011 Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте, 2011.
2. *Lin Chen-Yu, Mohd Rapik Saat*. Semi-quantitative risk assessment of adjacent track accidents on shared-use rail corridors // Proc. 2014 Joint Rail Conf. JRC2014, 2014, USA, pp. V001T06A007.
3. *Oh J., Washington S.P., Nam D.* Accident prediction model for railway-highway interfaces // Accident Anal. Prevent. 2006. V. 38. I. 2. P. 346–356.
4. *Saccomanno F.F., Park P.Y.-J., Fu L.* Estimating countermeasure effects for reducing collisions at highway-railway grade crossings // Accident Anal. Prevent. 2007. V. 39. I. 2. P. 406–416.
5. *Андриенко А.Я., Портнов-Соколов Ю.П.* Формирование риска при обеспечении безопасности сложных технических систем // Приборы и системы управления. 1996. № 12. С. 11–14.
6. *Хенли Э.Дж., Кумамото Х.* Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984.
7. *Рябинин И.А.* Концепция логико-вероятностной теории безопасности // Приборы и системы управления. 1993. № 10. С. 17–21.
8. *Радаев Н.Н.* Повышение точности прогноза вероятности катастроф за счет учета неоднородных статистических данных по ущербу // АИТ. 2000. № 3. С. 183–189.  
*Radaev N.N.* An Increase in the Accuracy of Prediction of Disasters by Accounting for Inhomogeneous Data on a Damage // Autom. Remote Control. 2000. V. 61. No. 3. P. 530–536.
9. *Махутов Н.А., Гаденин М.М., Чернявский А.О., Шатов М.М.* Анализ рисков отказов при функционировании потенциально опасных объектов // Проблемы анализа риска. 2012. Т. 9. № 3. С. 8–20.
10. *Larson R.C., Kamien David.* Decision models for emergency response planning. The McGraw-Hill Handbook of Homeland Security, 2004.
11. *Острейковский В.А., Швыряев Ю.В.* Безопасность атомных станций: Вероятностный анализ. М.: Физматлит, 2008.
12. *Katsman M.D., Myronenko V.K., Adamenko N.I.* Probabilistic model of ecological consequences of railroad accidents // Reliability: Theory Appl. 2013. V. 8. No. 1 (28). P. 72–85.
13. *Kolowrocki K., Soszynska-Budny J.* Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes, SpringerVerlag London Limited, 2011.
14. *Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кан Ю.С. и др.* Оценка рисков, связанных с проездом запрещающего сигнала светофора маневровым составом или пассажирским поездом // Надежность. 2016. № 3. С. 39–46.
15. *Шубинский И.Б.* Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа, Ульяновск: Обл. типография «Печатный двор», 2012.
16. *Жулев В.И., Иванов В.С.* Безопасность полетов летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1986.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 04.02.2016