

Применение системы автоматической сигнализации для снижения риска транспортных происшествий на железнодорожных станциях¹

Игорь Б. Шубинский, ЗАО «ИБТранс», Москва, Россия

Алексей М. Замышляев, ОАО «НИИАС», Москва, Россия

Алексей Н. Игнатов, Московский Авиационный институт, Москва, Россия

Андрей И. Кибзун, Московский Авиационный институт, Москва, Россия

Евгений Н. Платонов, Московский Авиационный институт, Москва, Россия

Резюме. Цель. Оценить риск столкновения составов при проведении маневровых работ на железнодорожной станции. Риск – сочетание вероятности события и его последствий. Наиболее сложной задачей при расчёте риска является выбор модели оценки вероятности появления нежелательного события. Модель должна обеспечивать практическую применимость результатов. Для объектов железнодорожного транспорта наибольший интерес представляет построение аналитической модели оценки вероятности в виду возможности наглядной демонстрации учитываемых в модели факторов. Основной целью данной работы является исследование степени влияния системы маневровой автоматической локомотивной сигнализации (МАЛС) на вероятность бокового столкновения составов с участием маневровых локомотивов на железнодорожной станции. Основной функцией системы маневровой автоматической локомотивной сигнализации является обеспечение непроезда маневровыми локомотивами светофоров с запрещающими показаниями на станции. **Методы.** Используются методы теории вероятностей и теории случайных процессов, формулы сложения, умножения, полной вероятности, свойства пуассоновских потоков. В статье [2] предложена методика расчета вероятности столкновения вследствие проезда маневровым или поездным локомотивом запрещающего сигнала светофора. Основным предположением при разработке методики является предположение о том, что поток маневровых составов для каждого стрелочного перевода является пуассоновским. В настоящей работе предлагается модификация данной методики с учётом возможности использования системы МАЛС на локомотивах маневровых составов. Исходными данными для реализации алгоритма вычисления вероятности столкновения служат топология станции, расписание движения пассажирских поездов и возможные маршруты их следования через станцию, средние значения длин составов и скоростей их движения, а также интенсивности движения маневровых составов через стрелочные переводы. **Результаты.** Получен алгоритм вычисления вероятности столкновения составов с участием маневровых локомотивов для произвольного промежутка времени. Для различных режимов движения маневрового состава: подтягивания, сцепки – приводятся расчетные формулы для вычисления вероятности столкновения с пассажирским или грузовым поездом на произвольной стрелке. Алгоритм состоит в следующем: 1) задается промежуток времени, для которого необходимо провести расчет вероятности столкновения; 2) формируется расписание следования пассажирских поездов из АСУ «Экспресс»; 3) вычисляется общее количество пассажирских поездов, проезжающих через станцию в течение заданного промежутка времени; 4) пассажирские поезда перенумеровываются согласно порядку их прибытия на станцию; 5) вычисляется вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим показанием; 6) вычисляется вероятность нарушения машинистом маневрового локомотива безопасности движения в режиме «подтягивание»; 7) вычисляется вероятность нарушения машинистом маневрового локомотива безопасности движения после сцепки с отключенным режимом «сцепка»; 8) вычисляется общее число возможных маршрутов для каждого поезда; 9) для каждого поезда определяется частота использования того или иного маршрута; 10) для всех стрелок на каждом маршруте присваиваются номера в порядке их появления; 11) вычисляется вероятность того, что с каждым пассажирским поездом на каждом маршруте произойдет хотя бы одно столкновение; 12) вычисляется вероятность того, что произойдет хотя бы одно столкновение каждого пассажирского поезда при движении через станцию; 13) рассчитывается вероятность того, что за заданный промежуток времени произойдет хотя бы одно столкновение на станции. Рассмотрен пример расчёта вероятности столкновения для отдельного маршрута поезда и для всей железнодорожной станции в целом в течение месяца и года. В работе показано, что применение системы МАЛС позволяет существенно уменьшить вероятность боковых столкновений на железнодорожной станции.

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

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, безопасность движения, маневровые работы, вероятность столкновения.

Формат цитирования: Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кибзун А.И., Платонов Е.Н. Применение системы автоматической сигнализации для снижения риска транспортных происшествий на железнодорожных станциях// Надежность. 2017. Т. 17, № 3. С. 49-57. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-3-49-57

1. Введение

При проведении как пассажирских, так и грузовых перевозок с определенной интенсивностью могут возникать различные неблагоприятные события, которые могут привести как к репутационным, так и материальным издержкам ОАО «РЖД», связанным, например, с ущербом инфраструктуре и/или подвижному составу. Поэтому для определения количественной характеристики опасности того или иного события вводят понятие риска, который согласно [1] является функционалом от вероятности и ущерба от неблагоприятного события.

Как отмечено в [2], при проведении маневровых работ на станции вследствие проезда запрещающего сигнала одним из участников движения возможны столкновения не только двух маневровых составов, но и, в частности, пассажирского поезда и маневрового состава, что, как выяснено в [3], может привести к гибели людей и, соответственно, большому ущербу. При этом, несмотря на то, что при проезде одного пассажирского поезда вероятность его столкновения с маневровым составом довольно мала, вероятность хотя бы одного столкновения за год по всем поездам, проезжающим через станцию, составляет довольно-таки существенную величину, особенно если на станции проводятся интенсивные маневровые работы. Для уменьшения вероятности столкновения поездов можно установить и использовать систему МАЛС.

При установке системы МАЛС на маневровые локомотивы возможны несколько режимов движения локомотива. Первый режим – «типичный», когда система МАЛС работает в штатном режиме. Второй режим – режим «подтягивание», когда система МАЛС отключена и машинист маневрового локомотива может подъехать к запрещающему сигналу светофора на расстояние ближе 20 метров и, следовательно, может проехать запрещающий сигнал, вследствие чего возможно столкновение между маневровым составом и пассажирским или грузовым поездом. Третий режим – режим «движение после сцепки с отключенным режимом «сцепка», когда при движении вагонами вперед система МАЛС некорректно определяет положение начала или конца состава, вследствие чего также возможен проезд запрещающего сигнала. Второй и третий режим являются нештатными режимами движения. Очевидно, что в «типичном» режиме маневровый локомотив находится большую часть времени, однако в двух других режимах вероятность проезда запрещающего сигнала существенно выше, поэтому каждый из этих случаев характеризуется своей вероятностью столкновения ма-

неврового состава с пассажирским/грузовым поездом и отдельно рассматривается в статье.

2. Алгоритм вычисления вероятности столкновения за произвольный промежуток времени при использовании системы МАЛС

Введем следующие обозначения:

- N – общее количество стрелок на станции;
- L – количество маневровых локомотивов;
- N_l – количество проезжаемых стрелок маневровой группой в час, $l=1, \dots, L$;
- r_l – количество полурейсов, $l=1, \dots, L$;
- s_l – количество сцепок с отключенным режимом сцепка, $l=1, \dots, L$;
- T_l – количество подтягиваний, $l=1, \dots, L$;
- l_m – средняя длина маневровой группы;
- l_n – средняя длина пассажирского поезда;
- v_n – средняя скорость движения пассажирского поезда по станции;
- v_m – средняя скорость движения маневровой группы по станции;
- v_t – средняя скорость движения маневровой группы по станции в режиме «подтягивание»;
- P_n – вероятность проезда запрещающего сигнала пассажирским поездом;
- $P_{m(один)}$ – вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим показанием при работе без помощника машиниста;
- $P_{m(двое)}$ – вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим показанием при работе с помощником машиниста;
- $P_{двое}$ – вероятность комплектования локомотивной бригады маневрового локомотива машинистом и его помощником;
- $P_{вм}$ – вероятность сцепки с последующим движением маневрового локомотива вместе с вагонами;
- $P_d(s)$ – вероятность непредотвращения дежурным по станции проследования машинистом маневрового локомотива запрещающего сигнала светофора в режиме «подтягивание»;
- $P_{тп}$ – вероятность проезда запрещающего сигнала машинистом маневрового локомотива в режиме «подтягивание», когда маневровый локомотив находится в голове поезда;
- $P_{тх}$ – вероятность проезда запрещающего сигнала машинистом маневрового локомотива в режиме «под-

тягивание», когда маневровый локомотив находится в хвосте поезда;

$P_{\text{сцх}}$ – вероятность нарушения безопасности движения составителем;

λ_c^i – интенсивность останавливающихся на стрелочных переводах маневровых групп, не нарушивших при пересечении стрелки безопасности движения, $i=1, \dots, N$;

τ_c^i – среднее время нахождения на стрелочном переводе маневровой группы, не нарушившей при пересечении стрелки безопасности движения, при условии остановки на стрелочном переводе, $i=1, \dots, N$;

τ_r – среднее время освобождения маневровой группой стрелочного перевода при попадании на него в режиме «подтягивание» после остановки на этом переводе.

1. Задается промежуток времени T , для которого необходимо провести расчет вероятности столкновения, получение расписания следования пассажирских поездов из АСУ «Экспресс». Согласно расписанию определяются все пассажирские поезда, следующие через станцию в течение времени T .

2. Определяется I – общее количество пассажирских поездов, проезжающих через станцию в течение времени T .

3. Присваиваются номера пассажирским поездам, следующим через станцию за рассматриваемый промежуток времени, по времени прибытия на станцию. Пассажирские поезда перенумеровываются согласно порядку их прибытия на станцию, то есть первый прибывший поезд, получает номер 1, второй – номер 2 и так далее.

4. Вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим показанием вычисляется по формуле

$$P_M = P_{\text{двос}} \cdot P_{\text{М(двос)}} + (1 - P_{\text{двос}}) \cdot P_{\text{М(один)}}$$

вероятность нарушения машинистом маневрового локомотива безопасности движения в режиме «подтягивание» определяется по формуле

$$P_T = \frac{1}{2} P_d (s)(P_{\text{тл}} + P_{\text{тх}}),$$

вероятность нарушения машинистом маневрового локомотива безопасности движения после сцепки с отключенным режимом «сцепка» определяется по формуле

$$P_{\text{сц}} = \left(1 - \frac{1}{2} P_{\text{вм}}\right) P_M + \frac{1}{2} P_{\text{вм}} P_{\text{сцх}}$$

Для каждой стрелки вычисляется

$\tilde{\lambda}_r$ – интенсивность нахождения маневровой группы в режиме «подтягивание» перед стрелкой

$$\tilde{\lambda}_r = \sum_{l=1}^L \frac{1}{N} \cdot \frac{T_l}{24},$$

$\tilde{\lambda}_{\text{сц}}$ – интенсивность пересечения стрелки маневровой группой после сцепки с отключенным режимом «сцепка»

$$\tilde{\lambda}_{\text{сцх}} = \sum_{l=1}^L \frac{N_l}{N} \cdot \frac{s_l}{r_l},$$

$\tilde{\lambda}_m$ – интенсивность пересечения стрелки маневровой группой в «обычном» режиме

$$\tilde{\lambda}_m = \sum_{l=1}^L \frac{N_l}{N} - \tilde{\lambda}_r P_T - \tilde{\lambda}_{\text{сцх}}$$

Интенсивность¹ λ_r^1 возможного пересечения стрелки маневровой группой в режиме «подтягивание» в некотором направлении l вычисляется по формуле $\lambda_r^1 = \tilde{\lambda}_r / 4$.

Интенсивность $\lambda_{\text{сцх}}^1$ пересечения стрелки маневровой группой после сцепки с отключенным режимом «сцепка» в некотором направлении l вычисляется по формуле $\lambda_{\text{сцх}}^1 = \tilde{\lambda}_{\text{сцх}} / 4$.

Интенсивность λ_m^1 пересечения стрелки маневровой группой в «обычном» режиме в некотором направлении l вычисляется по формуле $\lambda_m^1 = \tilde{\lambda}_m / 4$.

5. Величина i полагается равной единице.

6. Вычисляется K – общее число возможных маршрутов для i -го поезда.

7. Величина k полагается равной единице.

8. Для i -го поезда определяется частота использования того или иного маршрута²

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

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.

9. При обработке маршрута R_k присваиваются номера стрелкам, входящим в этот маршрут, согласно следованию через этот маршрут i -го поезда, то есть первая стрелка, которую пересекает пассажирский поезд, получает номер 1, вторая стрелка, которую пересекает пассажирский поезд, получает номер 2 и так далее. Пусть m – общее число стрелок, которые i -ый поезд, пересекает на маршруте R_k .

10. Величина j полагается равной единице.

11. В случае неизолированности³ j -ой стрелки маршрута R_k i -го пассажирского поезда определяются:

λ_m – интенсивность пересечения маневровой группой стрелочного перевода в «обычном» режиме в направле-

¹ Интенсивности могут быть уточнены при непосредственном сборе данных для каждого стрелочного перевода на рассматриваемой железнодорожной станции.

² Если отсутствуют данные о прошлых проездах поезда через станцию, то все маршруты полагаются равновероятными, то есть для любого k вероятность $P(R_k)$ использования маршрута R_k вычисляется по формуле $P(R_k) = 1/K$.

³ Изолированным стрелочным переводом называется тот, на котором столкновение, вызванное проездом светофора с запрещающим показанием, невозможно, неизолированным стрелочным переводом называется тот, на котором столкновение возможно.

нии, при котором возможно столкновение (выбирается из λ_m^1 , полученных на шаге 4, см. рисунок 1);

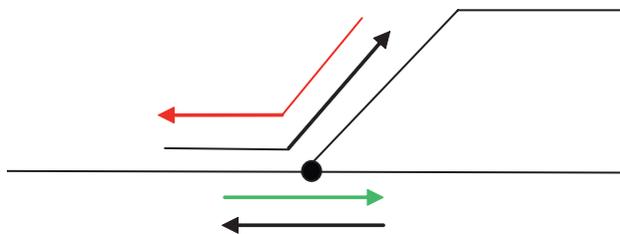


Рисунок 1 – Направление следования (отмечено красной стрелочкой) маневровой группы через стрелочный перевод (отмечен кружком), при котором возможно столкновение с пассажирским составом, следующим в направлении, показанном зеленой стрелочкой

λ_{cu} – интенсивность пересечения маневровой группой с маневровым локомотивом, прошедшим сцепку с отключенным режимом «сцепка», стрелочного перевода в направлении, при котором возможно столкновение (выбирается из λ_{cu}^1 , полученных на шаге 4, см. рисунок 1);

λ_t – интенсивность возможного пересечения маневровой группой с маневровым локомотивом, находившемся перед стрелочным переводом в режиме «подтягивание», стрелочного перевода в направлении, при котором возможно столкновение (выбирается из λ_t^1 , полученных на шаге 4, см. рисунок 1);

λ_c – интенсивность останавливающихся на j -ой стрелке маневровых групп;

τ_c – среднее время нахождения маневровой группы на j -ой стрелке при условии остановки на ней;

P_{nc} – вероятность остановки i -го пассажирского поезда на j -ой стрелке;

τ_{nc} – среднее время стоянки i -го пассажирского поезда на j -ой стрелке;

вероятность столкновения, произошедшего по вине машиниста маневрового локомотива (при отказе системы МАЛС), проехавшего светофор с запрещающим показанием

$$P_M(A_m) = \lambda_m P_m \left(\frac{l_n}{v_n} + \frac{l_m}{v_m} + P_{nc} \tau_{nc} \right);$$

вероятность столкновения, произошедшего по вине машиниста пассажирского поезда, проехавшего запрещающий сигнал

$$P_M(A_n) = P_n \lambda_m \left(\frac{l_m}{v_m} + \frac{l_n}{v_n} \right) + P_n \lambda_{cu} \left(\frac{l_m}{v_m} + \frac{l_n}{v_n} \right);$$

вероятность столкновения, произошедшего по вине машиниста пассажирского поезда, проехавшего запрещающий сигнал и столкнувшегося с вагонами, стоящими на стрелочном переводе

$$P_M(A_c) = P_n \lambda_c \tau_c;$$

вероятность столкновения, произошедшего по вине машиниста маневрового локомотива, проехавшего запрещающий сигнал в режиме «подтягивание»

$$P_M(A_t) = \lambda_t P_t \left(\frac{l_n}{v_n} + \frac{l_t}{v_t} + P_{nc} \tau_{nc} + \tau_t \right);$$

вероятность столкновения при проезде светофора с запрещающим показанием и машинистом маневрового локомотива, и машинистом пассажирского поезда

$$P_M(A_{tn}) = \lambda_t P_t P_n \left(\frac{l_t}{v_t} + \frac{l_n}{v_n} \right) + \lambda_m P_m P_n \left(\frac{l_n}{v_n} + \frac{l_m}{v_m} \right) + \lambda_{cu} P_{cu} P_n \left(\frac{l_n}{v_n} + \frac{l_m}{v_m} \right);$$

вероятность столкновения, произошедшего по вине машиниста маневрового локомотива, после сцепки с отключенным режимом «сцепка»

$$P_M(A_{cu}) = \lambda_{cu} P_{cu} \left(\frac{l_n}{v_n} + \frac{l_m}{v_m} + P_{nc} \tau_{nc} \right).$$

Результирующая вероятность столкновения на j -ой стрелке вычисляется по формуле

$$P_M(A_{k;j}) = \left(\lambda_m \left(\frac{l_n}{v_n} + \frac{l_m}{v_m} \right) (P_m (1 + P_n) + P_n) + \lambda_{cu} \left(\frac{l_n}{v_n} + \frac{l_m}{v_m} \right) (P_{cu} (1 + P_n) + P_n) + \lambda_t \left(\frac{l_t}{v_t} + \frac{l_n}{v_n} + \tau_t \right) \cdot P_t (1 + P_n) + \lambda_c P_n \tau_c + (\lambda_m P_m + \lambda_t P_t + \lambda_{cu} P_{cu}) P_{nc} \tau_{nc} \right) \cdot k_c,$$

где k_c принимает значение 1, если стрелочный перевод неизолированный, и 0, если изолированный, а остальные переменные, входящие в эту формулу, определены на шаге 1 и 4.

12. Если $j=m$, то переход к шагу 14, иначе переход к шагу 13.

13. $j:=j+1$, переход к шагу 11.

14. Вычисляется вероятность того, что с i -ым пассажирским поездом на маршруте R_k произойдет хотя бы одно столкновение, которая составляет

$$P_M(A_i | R_k) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_M(A_{k;j})),$$

где вероятности $P_M(A_{k;j})$ вычислены на шаге 11, величина m – на шаге 9.

15. Если $k=K$, то переход к шагу 17, иначе переход к шагу 16.

16. $k:=k+1$, переход к шагу 8.

17. Вычисляется вероятность того, что произойдет хотя бы одно столкновение пассажирского поезда с номером i при движении через станцию

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

где вероятности $P_M(A_i | R_k)$ вычислены на шаге 14, а вероятности $P(R_k)$ – на шаге 8, величина K – на шаге 6.

18. Если $i=I$, то переход к шагу 20, иначе переход к шагу 19.

19. $i:=i+1$, переход к шагу 6.

20. Рассчитывается вероятность того, что за промежуток времени T произойдет хотя бы одно столкновение

$$P_M(A_T) = P_M(A_1 + A_2 + \dots + A_T) = 1 - \prod_{i=1}^T (1 - P_M(A_i)).$$

3. Пример расчета вероятности столкновения пассажирского состава с маневровой группой для некоторой станции с установленной системой МАЛС

Пусть имеется 4 направления следования от и к станции (схема станции приведена на рисунке 2): северо-восточное, юго-восточное, северо-западное, юго-западное. С северо-восточного направления поезда следуют на станцию через путь F , с юго-восточного поезда следуют на станцию через путь D , с северо-западного поезда следуют на станцию через путь B , с юго-западного через путь B или путь C . Со станции на северо-восточное направление можно попасть по пути F , на юго-восточное направление можно попасть по пути E , на северо-западное направление можно попасть с пути A , на юго-западное направление можно попасть с пути B или C . Пусть пригородные поезда могут останавливаться только на 1, 3, 7, 8, 11, 12, 13 путях, а поезда дальнего следования и грузовые поезда могут останавливаться или проезжать через вокзал только по путям 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Пусть имеется расписание движения поездов за май и август. Заполним таблицы с данными,

необходимыми для применения алгоритма вычисления вероятности.

Рассмотрим пассажирский поезд 255Н, проследующий станцию без остановки, с северо-восточного направления на северо-западное, причем известно, что этот поезд будут пропускать только по первому пути. В этом случае у него имеется только 6 маршрутов передвижения через станцию.

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 сигнал светофора, когда в кабине локомотива находится машинист и его помощник и когда в кабине находится только один машинист (см. пункт 4 алгоритма)

$$P_M = P_{\text{двое}} \cdot P_{\text{м(двое)}} + (1 - P_{\text{двое}}) \cdot P_{\text{м(один)}} = 0,8 \cdot 7 \cdot 10^{-9} + (1 - 0,8) \cdot 2,1 \cdot 10^{-8} \approx 10^{-8}.$$

Вероятность нарушения безопасности движения машинистом маневрового локомотива в режиме «подтягивание» равна (см. пункт 4 алгоритма)

$$P_T = \frac{1}{2} P_d (s)(P_{\text{тл}} + P_{\text{тх}}) = \frac{1}{2} \cdot 10^{-2} \cdot (10^{-4} + 10^{-3}) = 5,5 \cdot 10^{-6},$$

вероятность нарушения безопасности движения машинистом маневрового локомотива после сцепки с

Таблица 1. Блок данных, описывающий топологию станции и маневровые работы на ней

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 маневровой группы	l_M	0,2	км
Средняя скорость движения маневровой группы по станции	v_M	4,2	км/ч
Вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим показанием при работе без помощника машиниста	$P_{\text{м(один)}}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	
Вероятность проезда машинистом маневрового локомотива светофора с запрещающим показанием при работе с помощником машиниста	$P_{\text{м(двое)}}$	$7 \cdot 10^{-9}$	
Вероятность комплектования локомотивной бригады маневрового локомотива машинистом и его помощником	$P_{\text{двое}}$	0,8	
Интенсивность останавливающихся на стрелочных переводах маневровых групп, не нарушивших при пересечении стрелки безопасности движения	$\lambda_{\text{с}}^1$	0,	1/ч,
	\dots , $\lambda_{\text{с}}^{102}$	\dots 0	\dots , 1/ч
Среднее время нахождения на стрелочном переводе маневровой группы, не нарушившей при пересечении стрелки безопасности движения, при условии остановки на стрелочном переводе	$\tau_{\text{с}}^1$	0,	ч,
	\dots , $\tau_{\text{с}}^{102}$	\dots 0	\dots , ч

отключенным режимом «сцепка» равна (см. пункт 4 алгоритма)

$$P_{\text{сч}} = \left(1 - \frac{1}{2} P_{\text{вм}}\right) P_{\text{м}} + \frac{1}{2} P_{\text{вм}} P_{\text{сч}} = \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4}\right) \cdot 10^{-8} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot 10^{-3} \approx 1,25 \cdot 10^{-4}.$$

Интенсивность нахождения маневровой группы в режиме «подтягивание» перед произвольной стрелкой равна (см. пункт 4 алгоритма)

$$\tilde{\lambda}_{\tau} = \sum_{l=1}^L \frac{1}{N} \cdot \frac{T_l}{24} = \frac{1}{102} \cdot \frac{3}{24} + \frac{1}{102} \cdot \frac{3}{24} = 0,0025 \text{ (1/ч)},$$

интенсивность пересечения произвольной стрелки маневровой группой после сцепки с отключенным режимом «сцепка» равна (см. пункт 4 алгоритма)

$$\tilde{\lambda}_{\text{сч}} = \sum_{l=1}^L \frac{N_l}{N} \cdot \frac{s_l}{r_l} = \frac{36}{102} \cdot \frac{2}{20} + \frac{36}{102} \cdot \frac{0}{22} = 0,035,$$

интенсивность пересечения стрелки маневровой группой в «обычном» режиме равна (см. пункт 4 алгоритма)

$$\tilde{\lambda}_{\text{м}} = \sum_{l=1}^L \frac{N_l}{N} - \tilde{\lambda}_{\tau} P_{\tau} - \tilde{\lambda}_{\text{сч}} = \frac{36}{102} + \frac{36}{102} - 0,0025 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} - 0,035 = 0,671.$$

Вычислим вероятность хотя бы одного столкновения на маршруте R_1 . Вероятность $P(R_1)$ использования маршрута R_1 равна (см. пункт 8 алгоритма)

$$P(R_1) = \frac{2}{2+1+0+0+0+0} = \frac{2}{3}.$$

Присвоим номера стрелкам согласно порядку их прохождения поездом (см. пункт 9 алгоритма): 115→1, 121→2, 151-147→3, 149-161→4, 244→5, 238→6, 236→7, 174→8, 164→9, 154→10, 144→11, 138→12.

Для стрелок №144, 236, 149-161, 151-147 имеем $\lambda_{\text{м}} = \tilde{\lambda}_{\text{м}} / 4 \approx 0,168$, $\lambda_{\tau} = \tilde{\lambda}_{\tau} / 4 \approx 0,0006$, $\lambda_{\text{сч}} = \tilde{\lambda}_{\text{сч}} / 4 \approx 0,009$ где деление на 4 проводится, так как у каждой маневровой группы есть 4 возможных направления для пересечения стрелочного перевода (см. рисунок 1).

Вероятность столкновения на неизолированных стрелках №144, 236, 149-161, 151-147 вычисляется по формулам (см. пункт 11 алгоритма)

Таблица 2. Блок дополнительных данных, описывающих топологию станции и маневровые работы на ней

Наименование	Обозначение	Количество	Единицы измерения
Количество полурейсов, совершенных локомотивом №1	r_1	20	шт
Количество полурейсов, совершенных локомотивом №2	r_2	22	шт
Количество сцепок с отключенным режимом сцепка, совершенных локомотивом №1	s_1	2	шт
Количество сцепок с отключенным режимом сцепка, совершенных локомотивом №2	s_2	0	шт
Количество подтягиваний, совершенных локомотивом №1	T_1	3	шт
Количество подтягиваний, совершенных локомотивом №2	T_2	3	шт
Длина маневрового локомотива (вагона)	l_{τ}	0,2	км
Средняя скорость движения маневровой группы по станции в режиме «подтягивание»	v_{τ}	2	км/ч
Среднее время освобождения маневровой группой стрелочного перевода при попадании на него в режиме «подтягивание» после остановки на этом переводе	τ_{τ}	0,01	ч
Вероятность сцепки с последующим движением маневрового локомотива вместе с вагонами	$P_{\text{вм}}$	0,25	
Вероятность непредотвращения дежурным по станции проследования машинистом маневрового локомотива запрещающего сигнала светофора в режиме «подтягивание»	$P_{\text{д}}^1(s)$	10^{-2}	
Вероятность проезда запрещающего сигнала машинистом маневрового локомотива в режиме «подтягивание», когда маневровый локомотив находится в голове поезда	$P_{\text{гл}}$	10^{-4}	
Вероятность проезда запрещающего сигнала машинистом маневрового локомотива в режиме «подтягивание», когда маневровый локомотив находится в хвосте поезда	$P_{\text{хв}}$	10^{-3}	
Вероятность нарушения безопасности движения составителем	$P_{\text{счх}}$	10^{-3}	

$$\begin{aligned}
 P_M(A_{1:3}) &= \lambda_M \left(\frac{I_{\Pi}}{V_{\Pi}} + \frac{I_M}{V_M} \right) (P_M(1+P_{\Pi}) + P_{\Pi}) + \\
 &+ \lambda_{\text{cu}} \left(\frac{I_{\Pi}}{V_{\Pi}} + \frac{I_M}{V_M} \right) (P_{\text{cu}}(1+P_{\Pi}) + P_{\Pi}) + \lambda_{\tau} \left(\frac{I_{\Pi}}{V_{\Pi}} + \frac{I_{\tau}}{V_{\tau}} + \tau_{\tau} \right) \cdot \\
 &\cdot P_{\tau}(1+P_{\Pi}) + \lambda_c P_{\Pi} \tau_c + (\lambda_M P_M + \lambda_{\tau} P_{\tau} + \lambda_{\text{cu}} P_{\text{cu}}) P_{\text{nc}} \tau_{\text{nc}} = \\
 &= 0,168 \cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,2}{4,2} \right) \cdot (10^{-8} \cdot (1+10^{-7}) + 10^{-7}) + \\
 &+ 0,009 \cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,2}{4,2} \right) \cdot (1,25 \cdot 10^{-4} \cdot (1+10^{-7}) + 10^{-7}) + \\
 &+ 0,0006 \cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,02}{2} + 0,01 \right) \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1+10^{-7}) = 6,8 \cdot 10^{-8}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_M(A_{1:4}) &= P_M(A_{1:7}) = P_M(A_{1:11}) = 0,168 \cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,2}{4,2} \right) \cdot \\
 &\cdot (10^{-8} \cdot (1+10^{-7}) + 10^{-7}) + 0,009 \cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,2}{4,2} \right) \cdot \\
 &\cdot (1,25 \cdot 10^{-4} \cdot (1+10^{-7}) + 10^{-7}) + 0,0006 \cdot \\
 &\cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,02}{2} + 0,01 \right) \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1+10^{-7}) = 6,8 \cdot 10^{-8}.
 \end{aligned}$$

Для изолированных стрелок 138, 154, 164, 174, 238, 244, 121, 115 вероятность столкновения на них равна нулю, то есть

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

Вероятность хотя бы одного столкновения пассажирского поезда №255Н на маршруте R_1 равна (см. пункт 14 алгоритма)

$$\begin{aligned}
 P_M(A_1 | R_1) &= 1 - 1 \cdot 1 \cdot (1 - 6,8 \cdot 10^{-8}) \cdot (1 - 6,8 \cdot 10^{-8}) \cdot \\
 &\cdot 1 \cdot 1 \cdot (1 - 6,8 \cdot 10^{-8}) \cdot 1 \cdot 1 \cdot (1 - 6,8 \cdot 10^{-8}) \cdot 1 = 2,7 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

Вычислим вероятность хотя бы одного столкновения на маршруте R_2 . Вероятность $P(R_2)$ использования маршрута R_2 равна (см. пункт 8 алгоритма)

$$P(R_2) = \frac{1}{2+1+0+0+0+0} = \frac{1}{3}$$

Для стрелок №144, 236, 149-161, 151-147 имеем $\lambda_M = \tilde{\lambda}_M / 4 \approx 0,168$, $\lambda_{\tau} = \tilde{\lambda}_{\tau} / 4 \approx 0,0006$, $\lambda_{\text{cu}} = \tilde{\lambda}_{\text{cu}} / 4 \approx 0,009$.

Присвоим номера стрелкам согласно порядку их прохождения поездом (см. пункт 9 алгоритма): 115→1, 121→2, 151-147→3, 149-161→4, 244→5, 238→6, 236→7, 176→8, 144→9, 138→10.

Вероятность столкновения на неизолированных стрелках №144, 236, 149-161, 151-147 вычисляется по формулам (см. пункт 11 алгоритма)

$$\begin{aligned}
 P_M(A_{2:3}) &= \lambda_M \left(\frac{I_{\Pi}}{V_{\Pi}} + \frac{I_M}{V_M} \right) (P_M(1+P_{\Pi}) + P_{\Pi}) + \lambda_{\text{cu}} \left(\frac{I_{\Pi}}{V_{\Pi}} + \frac{I_M}{V_M} \right) \cdot \\
 &\cdot (P_{\text{cu}}(1+P_{\Pi}) + P_{\Pi}) + \lambda_{\tau} \left(\frac{I_{\Pi}}{V_{\Pi}} + \frac{I_{\tau}}{V_{\tau}} + \tau_{\tau} \right) P_{\tau}(1+P_{\Pi}) + \lambda_c P_{\Pi} \tau_c + \\
 &+ (\lambda_M P_M + \lambda_{\tau} P_{\tau} + \lambda_{\text{cu}} P_{\text{cu}}) P_{\text{nc}} \tau_{\text{nc}} = 0,168 \cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,2}{4,2} \right) \cdot \\
 &\cdot (10^{-8} \cdot (1+10^{-7}) + 10^{-7}) + 0,009 \cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,2}{4,2} \right) \cdot \\
 &\cdot (1,25 \cdot 10^{-4} \cdot (1+10^{-7}) + 10^{-7}) + 0,0006 \cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,02}{2} + 0,01 \right) \cdot \\
 &\cdot 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1+10^{-7}) = 6,8 \cdot 10^{-8}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_M(A_{2:4}) &= P_M(A_{2:7}) = P_M(A_{2:9}) = 0,168 \cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,2}{4,2} \right) \cdot \\
 &\cdot (10^{-8} \cdot (1+10^{-7}) + 10^{-7}) + 0,009 \cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,2}{4,2} \right) \cdot \\
 &\cdot (1,25 \cdot 10^{-4} \cdot (1+10^{-7}) + 10^{-7}) + 0,0006 \cdot \\
 &\cdot \left(\frac{0,48}{42} + \frac{0,02}{2} + 0,01 \right) \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1+10^{-7}) = 6,8 \cdot 10^{-8}.
 \end{aligned}$$

Для изолированных стрелок 138, 176, 238, 244, 121, 115 вероятность столкновения на них равна нулю, то есть

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

Вероятность хотя бы одного столкновения пассажирского поезда №255Н равна (см. пункт 14 алгоритма)

$$\begin{aligned}
 P_M(A_1 | R_2) &= 1 - 1 \cdot 1 \cdot (1 - 6,8 \cdot 10^{-8}) \cdot (1 - 6,8 \cdot 10^{-8}) \cdot \\
 &\cdot 1 \cdot 1 \cdot (1 - 6,8 \cdot 10^{-8}) \cdot 1 \cdot (1 - 6,8 \cdot 10^{-8}) \cdot 1 = 2,7 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

Вероятность использования маршрутов R_3, R_4, R_5, R_6 равна нулю (см. пункт 8 алгоритма), поскольку

$$P(R_3) = P(R_4) = P(R_5) = P(R_6) = \frac{0}{2+1+0+0+0+0} = 0.$$

Поэтому вероятности $P_M(A_1 | R_3), P_M(A_1 | R_4), P_M(A_1 | R_5), P_M(A_1 | R_6)$ хотя бы одного столкновения на этих маршрутах можно не считать.

Вероятность хотя бы одного столкновения пассажирского поезда 255Н при проезде через станцию составляет (см. пункт 17 алгоритма)

$$\begin{aligned}
 P_M(A_1) &= \sum_{k=1}^K P_M(A_1 | R_k) P(R_k) = \sum_{k=1}^6 P_M(A_1 | R_k) P(R_k) = \\
 &= 2,7 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{2}{3} + 2,7 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{3} = 2,7 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

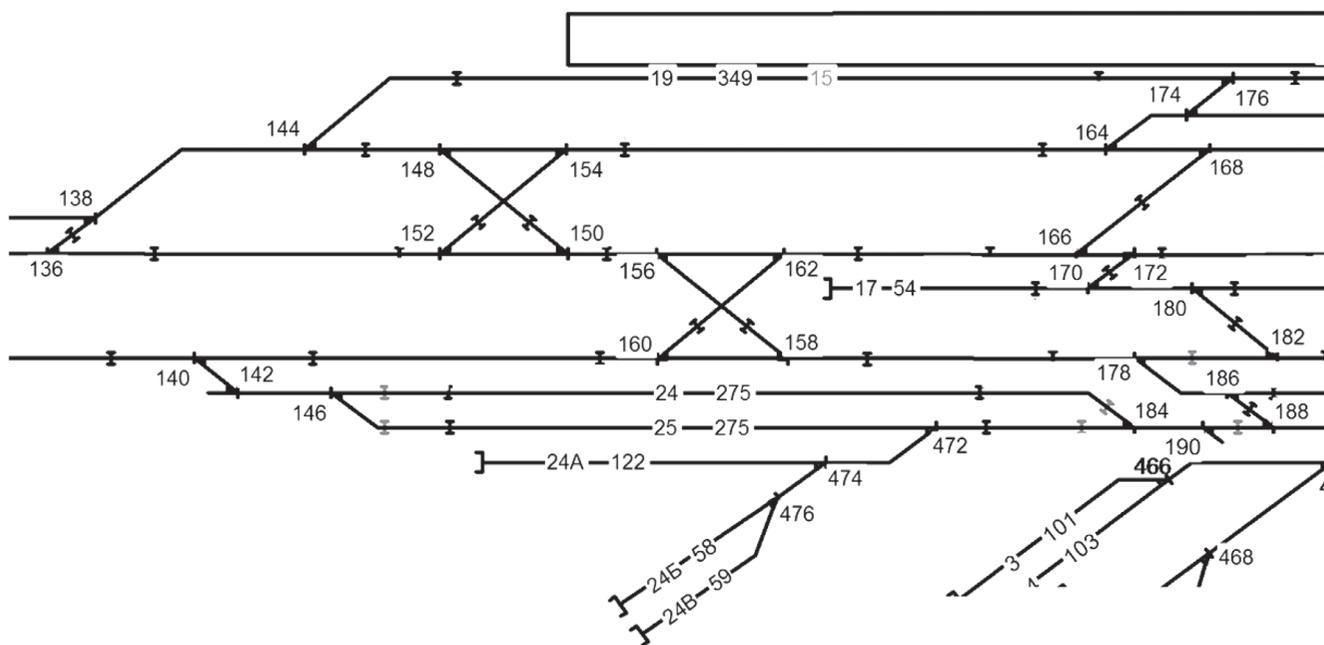


Рисунок 2 – Схема станции, для которой производится расчет вероятности столкновения

Вычислим теперь вероятность хотя бы одного столкновения для некоторой станции с установленной системой МАЛС за год.

Пусть для всех поездов, неизвестны прошлые проезды через станцию. Тогда вероятность хотя бы одного столкновения пассажирских поездов, проследующих станцию без остановки, с маневровой группой за май составляет

$$P_M(A_{\text{май}}) = 0,00002.$$

Вероятность хотя бы одного столкновения пассажирских поездов, проследующих станцию без остановки, с маневровой группой за август составляет

$$P_M(A_{\text{август}}) = 0,00008.$$

Интенсивность движения поездов в августе является пиковой, т.е. в остальные месяцы вероятность хотя бы одного столкновения будет меньше. Это предположение подтверждается анализом расписания движения. Отсюда получаем, что вероятность хотя бы одного столкновения за год оценивается величиной

$$P_M(A_{\text{год}}) = 1 - (1 - 0,00008)^{12} = 0,00096$$

В случае использования системы МАЛС на станции наибольшее влияние на вероятность хотя бы одного столкновения пассажирского поезда, проезжающего через станцию, оказывает слагаемое, связанное со сцепкой. Это объясняется тем, что вероятность проезда маневровой группой светофора с запрещающим показанием при сцепке с отключенным режимом

«сцепка» оказывается больше, нежели чем в режиме «подтягивание» или при проведении остальных маневровых работ. Если же рассматривается грузовой поезд, то на вероятность его столкновения с маневровой группой наибольшее влияние оказывает слагаемое, не связанное со сцепкой или подтягиванием. Это связано с высокой вероятностью проезда запрещающего сигнала машинистом грузового состава. При этом вероятность хотя бы одного столкновения пассажирского поезда ожидаемо меньше, чем вероятность хотя бы одного столкновения грузового поезда. Это связано и с тем, что вероятность проезда запрещающего сигнала машинистом грузового поезда на два порядка выше, чем вероятность проезда запрещающего сигнала машинистом маневрового поезда, и с тем, что грузовые поезда длиннее пассажирских, а значит, большее время будут находиться на стрелочном переводе, следовательно, большее время будет возможность столкновения.

Если сравнить полученную вероятность хотя бы одного столкновения в течение года с аналогичной вероятностью, полученной в [2] для маневровых локомотивов без использования системы МАЛС, то эта вероятность оказывается на порядок меньше.

6. Заключение

В статье рассмотрены вопросы оценки рисков столкновения на железнодорожной станции, на которой маневровые локомотивы могут быть оборудованы системой МАЛС. Основное внимание уделено методике расчёта вероятности столкновения пассажирских поездов с маневровыми составами на железнодорожной

станции, основанной на интенсивностях движения маневровых составов и конкретного расписания движения пассажирских поездов. Использование системы МАЛС для железнодорожной станции позволяет существенно уменьшить вероятность столкновения в течение года.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 33433–2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте».
2. Игнатов А.Н., Кибзун А.И., Платонов Е.Н. Оценка вероятности столкновения железнодорожных составов // *Автоматика и телемеханика*, №11. 2016. С. 43—59.
3. 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.
4. Шубинский И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа, Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2012.

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.Zamyshlaev@gismps.ru

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

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

Евгений Н. Платонов – кандидат физико-математических наук, доцент, Московский Авиационный институт, факультет «Прикладной математики и физики», доцент, Москва, Россия, тел. +7 (499) 158-45-60, e-mail: en.platonov@gmail.com

Поступила 17.03.2017