

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

**Л.А. Баранов**

*Российский университет транспорта (МИИТ)*

Россия, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

E-mail: [baranov.miit@gmail.com](mailto:baranov.miit@gmail.com)

**Ключевые слова:** безопасность движения, интервал попутного следования поездов, условия обеспечения безопасности, погрешности измерения пути и скорости, защитный промежуток, идеальная система обеспечения безопасности движения, оценки минимального интервала попутного следования поездов, радиоканал, вероятность отказа от декодирования, вероятность трансформации.

**Аннотация:** Изложена методика аналитической оценки минимального интервала попутного следования поездов при построении систем обеспечения безопасности движения на базе радиоканала. Приведены примеры аналитических оценок интервалов попутного следования поездов по условиям безопасности движения при наличии ограничений скорости на перегоне, минимального интервала между уходящим и прибывающим поездом на станции, учтено влияние радиоканала на минимальный интервал попутного следования.

## 1. Введение

Использование высокоскоростного транспорта на магистральных железных дорогах, повышение интенсивности движения в условиях метрополитенов и других городских железнодорожных скоростных транспортных систем делает необходимым создание интегрированных централизованных беспилотных систем управления. Опыт создания и эксплуатации таких систем имеется как в нашей стране, так и за рубежом [1-3]. Развитие микропроцессорной техники и средств связи позволяет объединять в рамках единой системы функции автоматического планирования движения поездов (составления графика движения и графика оборота составов) [4,5] беспилотных централизованных систем управления движением, включающих системы обеспечения безопасности [1, 2, 6], системы диагностики подвижного состава [6]. Обеспечение безопасности движения является важнейшей функцией этих систем, роль которой нельзя переоценить особенно в условиях повышения интенсивности и скорости движения.

На железных дорогах мира используются системы обеспечения безопасности движения (СОБД) поездов на базе радиоканала [7, 8], которые называются системами интервального регулирования движением поездов (ИРДП). Этот термин не соответствует принятому в теории автоматического управления. ИРДП задают ограничения на управление – ограничивают скорость движения при опасном сближении поездов. Проблеме использования ИРДП с радиоканалом на отечественных железных дорогах посвящены работы [7, 9, 10].

Очевидным достоинством систем обеспечения безопасности на базе радиоканала является отсутствие фиксированных блок - участков, что может позволить уменьшить интервал попутного следования, отсутствие рельсовых цепей, реализация помехоустойчивости которых предъявляет требования к фильтрации помех, возникающих в тяговом приводе и устройствах энергоснабжения. Кроме того, рельсовые цепи требуют определенных эксплуатационных мероприятий для обеспечения надежности функционирования систем ИРДП.

Вместе с тем системы с радиоканалом не обеспечивают контроль целостности ходовых рельсов, что является препятствием для их использования. Для снятия этого препятствия рассматриваются возможности разработки отдельных систем контроля целостности ходовых рельсов.

## 2. Безопасность движения поездов в беспилотных транспортных системах

Рассмотрим алгоритм функционирования системы обеспечения безопасности движения на базе обмена информацией по радиоканалу. Пусть информация о координате и скорости впереди идущего (первого) поезда по радиоканалу поступает на сервер, который передает ее сзади идущему (второму) поезду. Если сзади идущий поезд через каждый достаточно малый промежуток времени  $T$ , равным сумме времен передачи информации по радиоканалу с учетом способа его построения, протокола функционирования и длительности обработки информации в сервере, получает информацию только о координате «хвоста» впереди идущего поезда и допускает мгновенную остановку этого поезда, то определение допустимой по условиям безопасности скорости движения сзади идущего поезда называют управлением по координате «хвоста». При передаче дополнительной информации о скорости впереди идущего поезда определение допустимой скорости сзади идущего поезда выполняется с учетом пути экстренного торможения впереди идущего поезда. Расчет допустимой скорости движения поезда осуществляется бортовым устройством системы обеспечения безопасности.

Результаты расчета минимального интервала попутного следования, полученные при управлении с учетом пути экстренного торможения являются более общим. Во-первых, в этих условиях интервал попутного следования по условиям безопасности движения получается минимально возможным; во-вторых, если в выражениях, определяющих минимальный интервал попутного следования поездов, принять равным нулю путь экстренного торможения впереди идущего поезда (что равносильно допущению о равенстве бесконечности величины замедления), то получим результаты при управлении по координате «хвоста» впереди идущего поезда.

Введем следующие обозначения:  $S_1, \overset{0}{S}_1$  – соответственно измеренное и истинное значение координаты «хвоста» впереди идущего поезда;  $S_2, \overset{0}{S}_2$  – соответственно измеренное и истинное значение координаты «головы» сзади идущего поезда;  $\Delta S_1 = \overset{0}{S}_1 - S_1$  и  $\Delta S_2 = \overset{0}{S}_2 - S_2$  – погрешности измерения координат поездов;  $V_1, \overset{0}{V}_1$  – соответственно измеренные и истинные значения скорости впереди идущего поезда;  $V_2, \overset{0}{V}_2$  – соответ-

ственно измеренные и истинные значения скорости сзади идущего поезда;  $\Delta V_1 = V_1^0 - V_1$  и  $\Delta V_2 = V_2^0 - V_2$  - погрешности измерения скоростей поездов.

Так как величины погрешностей являются случайными и могут быть как положительными, так и отрицательными, то в дальнейшем выбор знака погрешности будет зависеть от того, как эта погрешность влияет на требуемый результат расчета.

При движении поездов расстояние между «хвостом» впереди идущего и «головой» сзади идущего поезда по условиям безопасности не должно быть менее разности пути служебного торможения  $S_{T2}$  сзади идущего поезда, скорость которого равна  $V_2$  и пути экстренного торможения впереди идущего поезда, скорость которого  $V_1$ . Если  $S_1^0$  - координата «хвоста» впереди идущего поезда, а  $S_2^0$  - координата «головы» поезда, следующего за ним, сформулированные выше условия записываются в виде:

$$S_1^0 - S_2^0 \geq S_{T2}(V_2) - S_{T1}(V_1).$$

При построении и функционировании СОБД используются измеренные значения соответствующих величин. При замене истинных значений измеренными с погрешностями без принятия необходимых поправок может привести к аварийным результатам.

Условия безопасности при фиксированных выше величинах погрешностей выполняются когда

$$S_1 - S_2 \geq S_{T2}(V_2) - S_{T1}(V_1) + [\Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_{T1}(V_1 + \Delta V_1) + \Delta S_{T2}(V_2 + \Delta V_2)]$$

Из этого выражения следует, что для определения допустимой скорости движения по условиям безопасности при использовании результатов измерений пути и скорости с погрешностями необходимо введение защитного промежутка длиной

$$S_{защ} > \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_{T1}(V_1 + \Delta V_1) + \Delta S_{T2}(V_2 + \Delta V_2),$$

определенной величинами и знаками соответствующих погрешностей.

Интервал попутного следования поездов в некоторой точке  $S_0$  перегона определяется

$$(1) \quad T_u(S_0) = T_2(S_0) - T_1(S_0),$$

где  $T_1(S_0)$  и  $T_2(S_0)$  - моменты проследования «головами» соответственно первого и второго поезда точки  $S_0$ .

При нахождении «головы» первого поезда в точке  $S_1$  пути (следовательно «хвост» этого поезда находится в точке  $S_1 - l_{сост}$ , где  $l_{сост}$  - длина состава), «головы» второго поезда в точке

$$S_2 = S_1 - l_{сост} - S_{защ} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1),$$

система СОБД еще не ограничивает скорость движения  $V_2$ , сзади идущего поезда. Это можно записать, следующим образом

$$(2) \quad T_2[S_2 = S_1 - S_{защ} - l_{сост} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1)] \geq T_1(S_1) + T_\delta,$$

где  $T_2$  - момент времени, когда «голова» второго поезда, который движется со скоростью  $V_2$  находится в точке

$$S_2 = S_1 - S_{защ} - l_{сост} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1),$$

$T_1$  - момент времени, когда «хвост» первого поезда, который движется со скоростью  $V_1$ , находится в точке  $S_1 - l_{сост}$ ,  $T_\delta$  - время доставки второму поезду информации о координате «хвоста» и скорости первого поезда.

Оценку величины  $T_\delta$  приведем в дальнейшем. Будем считать, что время доставки информации не зависит от координат поездов.

В неравенстве (2) координаты  $S_2, S_1, V_1, V_2$  – измеренные переменные, отличающиеся от истинных. Для компенсации влияния времени реакции машиниста (или поездного устройства системы автоведения) вводится  $\Phi_{\min}$  – факультатив, в частности, обычно равный 5 сек для условий метрополитена.

Следовательно, согласно (2)

$$(3) \quad \Phi_{\min} \geq T_2 [S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - l_{\text{сост}} - S_{T_2}(V_2) + S_{T_1}(V_1)] - T_1(S_1) - T_\delta.$$

Из (1) и (3) получен  $T_{u\min}$  – минимальный интервал попутного следования определяется максимальным значением правой части

$$(4) \quad T_{u\min} = \max_{S_1} \left\{ \Phi_{\min} + T_\delta + T_2(S_0) - T_2 [S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - l_{\text{сост}} - S_{T_2}(V_2) + S_{T_1}(V_1)] + T_1(S_1) - T_1(S_0) \right\}$$

Точка с координатами  $S_1$  и соответственно  $V_1$ , в которой обеспечивается максимум правой части (4) будем называть лимитирующей.

Необходимой условие максимума правой части (4) имеет вид

$$\frac{d}{dS_1} \left\{ \Phi_{\min} + T_\delta - T_1(S_0) + T_1(S_1) - T_2 [S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - l_{\text{сост}} - S_{T_2}(V_2) + S_{T_1}(V_1)] \right\} = 0$$

Откуда

$$(5) \quad \frac{V_2 [S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - l_{\text{сост}} - S_{T_2}(V_2) + S_{T_1}(V_1)]}{1 + \frac{dS_{T_1}(V_1)}{dS_1}} = V_1 (S_1 - l_{\text{сост}}).$$

Положив в этом выражении  $S_{\text{защ}} = 0$  получаем результат, совпадающим с соответствующим условием для идеальной системы обеспечения безопасности [11].

Уравнение (5) совместно с заданными траекториями движения поездов позволяют определить координаты лимитирующей точки ( $S_1, V_1$ ).

Можно показать, что рассмотрение процесса экстренного торможения как равнозамедленного практически не вносит погрешности в вычисление  $T_{u\min}$ .

На базе общего подхода, изложенного ранее, рассмотрим определение минимального интервала попутного следования при наличии ограничений скорости на перегоне. Если принять, что поезда двигаются со скоростью  $V_{10}$  до начала участка скоростного ограничения, затем со скоростью  $V_{20} < V_{10}$  на участке ограничения и со скоростью  $V_{30} > V_{20}$  после окончания ограничения.

То положение лимитирующей точки соответствует  $S_0 = S_{1i}$  для трех случаев  $i = 1, 2, 3$  полученных из условия (5), когда  $a_1 = 0$ .

После подстановки  $S_{1i}$  в (4) запишем выражение  $T_{umini}$

$T_{umini} = \Phi_{\min} + T_g + T_2(S_{1i}) - T_2 [S_{1i} - l_{\text{сост}} - S_{\text{защ}} - S_{T_2}(V_{2i}) + S_{T_1}(V_{1i})]$ , где  $V_{1i}$  и  $V_{2i}$  – соответственно скорости первого и второго поездов в лимитирующей точке. Откуда получаем

$$T_{umini} = \Phi_{\min} + T_g + \frac{l_{\text{сост}} + S_{\text{защ}} + S_{T_2}(V_{20}) + S_{T_1}(V_{20})}{V_{20}},$$

Выражение для определения минимального интервала попутного следования между уходящим со станции и прибывающим поездами получены по той же методике и имеют аналогичную структуру, определяющих, как

$$T_g = P^{n-1}(1 - P),$$

где  $P$  – вероятность отказа от декодирования,  $T$  – длительность пакета,  $n - 1$  – число пакетов, после отказа декодирования которых система переходит в состояние защитного отказа.

### 3. Заключение

Основными результатами данной статьи является аналитическая оценка интервала попутного исследования поездов при построении систем обеспечения безопасности движения на базе радиоканала.

### Список литературы

1. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Баранов Л.А., Головичер Я.М., Ерофеев Е.В., Максимов В.М. Под ред. Л.А. Баранова. М.: Транспорт, 1990. 272 с.
2. Баранов Л.А. Автоматическое управление движением поездов метрополитена // Мир транспорта. 2018. № 2. С. 156-165.
3. Никульчиков П.М. История, состояние и перспективы развития систем автоматического управления поездами метрополитена // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 3. С. 450-473.
4. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И., Филипченко К.М., Чжо // Применение современных технологий программирования к автоматизации планирования движения поездов метрополитена. // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 3 С. 331-347.
5. Сидоренко В.Г., Чжо. Исследование возможности применения генетических алгоритмов к решению задач планирования работы электроподвижного состава метрополитена // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 6. С. 37-40.
6. Медуницын Н.Б., Малинин О.В. Автоматизированные системы управления, диагностики и безопасности движения вагонов метро нового поколения // Научные технологии. 2005. № 6. С. 8-11.
7. Шаманов В.И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4, № 2. С. 223-240.
8. Озеров А.В. Эволюция европейской системы управления движением поездов // Железные дороги мира. 2018. № 3. С. 64-73.
9. Шухина Е.Е., Низовский А.В. Системы обеспечения безопасности движения поездов на базе радиоканала // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 10. С. 25-26.
10. Попов П.А., Озеров А.В. Интервальное регулирование на основе цифрового радиоканала // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 10. С. 19-22.
11. Баранов Л.А. Потенциальная оценка интервала попутного следования поездов и управление движением // Вестник МИИТа. 2007. № 17. С. 27-45.