



# Оценка интервала попутного следования метropоездов для систем безопасности на базе радиоканала



Леонид БАРАНОВ

Leonid A. BARANOV

## Evaluation of Metro Train Succession Time for Safety Systems Based on Radio Channel

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 14)

**Повышение безопасности движения метropоездов в условиях, когда растет интенсивность пассажиропотоков, требует совершенствования управления, сочетания автоматизации и системного обмена информацией по радиоканалу. В статье теоретическими расчетами обосновывается возможность оценки минимального интервала попутного следования поездов по линии метрополитена, оборудованной системой безопасности и информационными средствами класса Communications-Based Train Control (CBTC). В качестве базовой используется авторская методика, позволяющая сравнивать получаемые величины с потенциально возможными для «идеальной системы».**

**Ключевые слова:** метрополитен, поезд, интервал попутного следования, система безопасности движения, аналитическая оценка, методика, математический расчет, алгоритм, радиоканал, информация.

*Баранов Леонид Аврамович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*

**В**ыполнение требований комфорта и безопасности перевозки пассажиров, особенно при высокой интенсивности графика, предполагает совершенствование систем автоматического или автоматизированного управления движением поездов. Единое объединяющее начало должны иметь системы диспетчерского управления, системы централизованного автоведения, системы обеспечения безопасности [1,2].

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Реализация высокой интенсивности движения связана с необходимостью обладать достаточной мощностью тяговых подстанций, уменьшением сопротивления тяговых сетей и повышением уровня их защиты, возможностью различения соизмеримых токов нагрузки и удаленного короткого замыкания, что все более актуально при увеличении мощности современного подвижного состава.

Соблюдение ограничений, связанных с энергетическим обеспечением заданной интенсивности движения, ставит задачу реализации требуемого интервала попутного следования системами безопасности и станционной централизации. На отечест-

венных метрополитенах успешно эксплуатируется система автоблокировки APC-АЛС, используются рельсовые цепи как датчики позиционирования поездов, детекторы целостности ходовых рельсов, определители занятости блок-участка [3,4]. Вместе с тем широко дебатруется вопрос о применении систем обеспечения безопасности движения на базе радиоканала (класса CBTC – Communications-Based Train Control) [5]. Очевидным их достоинством является отсутствие фиксированных блок-участков, а также рельсовых цепей, для помехоустойчивости которых нужна фильтрация помех, возникающих в тяговом приводе и устройствах энергоснабжения.

Известно, однако, что системы с CBTC не обеспечивают контроль целостности ходовых рельсов, из-за чего затруднено их использование. Для снятия этого препятствия рассматриваются варианты разработки отдельных систем контроля либо совмещения систем APC-АЛС и систем обмена информацией по радиоканалу.

Аргументами, определяющими достоинства такого подхода, является повышение безопасности движения за счет параллельно действующих независимых систем, реализованных на различных физических принципах. Хотя одновременно возникает и еще одна проблема: при параллельно действующих системах безопасности ограничение принимается по более безопасному сигналу. Следовательно, в этих условиях достоинства системы, построенной на принципах CBTC и призванной поддерживать минимальный интервал попутного следования, будут востребованы в случае неработоспособности классической системы APC-АЛС.

В имеющихся публикациях по системам CBTC описываются принципы их построения [6], полигоны и вид решения [7], требования к радиоканалу [8].

В данной статье представлена оценка минимального интервала попутного следования поездов по линии метрополитена, оборудованной системой безопасности движения на базе обмена информацией по радиоканалу (класса CBTC). При этом использована методика получения потенциально возможного минимального интервала попутного следования, разработанная автором для «идеальной системы» [9].

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

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

Результаты расчета минимального интервала попутного следования, полученные при управлении с учетом пути экстренного торможения, являются более общими. Во-первых, в этом случае интервал по условиям безопасности движения минимально возможный; во-вторых, если в выражениях, определяющих минимальный интервал попутного следования поездов, принять равным нулю путь экстренного торможения идущего впереди поезда (что равносильно допущению о равенстве бесконечности величины замедления), то будем иметь вариант с управлением по координате «хвоста». Разность величины интервалов попутного следования при этих двух принципах построения системы обеспечения безопасности движения (СОБД) позволит оценить эффективность использования дополнительной информации об идущем впереди поезде. Такой подход применен автором для определения потенциально возможного минимального интервала попутного следования при идеальной СОБД [9], в которой информация о координатах и скоростях поездов была без погрешностей, а передача данных считалась мгновенной и безошибочной.





Введем следующие обозначения:

$S_1, S_1^0$  — соответственно измеренное и истинное значения координаты «хвоста» идущего впереди поезда;

$S_2, S_2^0$  — измеренное и истинное значения координаты «головы» идущего сзади поезда;

$\Delta S_1 = S_1^0 - S_1$  и  $\Delta S_2 = S_2^0 - S_2$  — погрешности измерения координат поездов;

$V_1, V_1^0$  — измеренные и истинные значения скорости идущего впереди поезда;

$V_2, V_2^0$  — измеренные и истинные значения скорости идущего сзади поезда;

$\Delta V_1 = V_1^0 - V_1$  и  $\Delta V_2 = V_2^0 - V_2$  — погрешности измерения скоростей поездов.

Поскольку величины погрешностей являются случайными и могут быть или положительными, или отрицательными, то в дальнейшем выбор знака погрешности будет зависеть от того, как она влияет на результат расчета. Так, знак «минус» перед величиной погрешности говорит о том, что измеренное значение больше истинного, в противном случае ставится знак «плюс».

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

$$S_1^0 - S_2^0 \geq S_{T2}(V_2) - S_{T1}(V_1). \quad (1)$$

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

Так, если координата «головы» второго поезда измерена с погрешностью  $+\Delta S_2$ ,

а координата «хвоста» первого с погрешностью —  $\Delta S_1$ , то истинное расстояние между «головой» второго и «хвостом» первого поездов составляет

$$S_1 - \Delta S_1 - (S_2 + \Delta S_2) = S_1 - S_2 - (\Delta S_1 + \Delta S_2). \quad (2)$$

Отсюда величина  $S_1 - S_2$ , используемая СОБД для расчета допустимой скорости, превышает истинную на  $\Delta S_1 + \Delta S_2$ , что может привести к увеличению допустимой скорости и, как следствие, к аварии.

К такому же результату приводят погрешности измерения скорости. Пусть истинная скорость второго поезда  $V_2^0 = V_2 + \Delta V_2$ , а первого —  $V_1^0 = V_1 - \Delta V_1$ ; значения  $V_1$  и  $V_2$  принимаются СОБД при расчете допустимой скорости как исходные. Поскольку  $S_{T2}(V_2 + \Delta V_2) > S_{T2}(V_2)$ ,  $S_{T1}(V_1 + \Delta V_1) > S_{T1}(V_1)$ , то  $S_{T2}(V_2) - S_{T1}(V_1) > S_{T2}(V_2 + \Delta V_2) - S_{T1}(V_1 - \Delta V_1)$ .

Если обозначить  $S_{T2}(V_2 + \Delta V_2) - S_{T2}(V_2) = \Delta S_{T2}(V_2 + \Delta V_2)$ ,  $S_{T1}(V_1 + \Delta V_1) - S_{T1}(V_1) = \Delta S_{T1}(V_1 + \Delta V_1)$ , то  $S_{T2}(V_2) - S_{T1}(V_1) < S_{T2}(V_2) + \Delta S_{T2}(V_2 + \Delta V_2) - S_{T1}(V_1) + \Delta S_{T1}(V_1 + \Delta V_1)$ .

Отсюда следует, что замена в (1) величин  $V_2$  и  $V_1$  на  $V_2 + \Delta V_2$  и  $V_1 - \Delta V_1$  уменьшает правую часть на величину  $\Delta S_{T2}(V_2 + \Delta V_2) + \Delta S_{T1}(V_1 + \Delta V_1)$ , что в свою очередь приводит к нарушению требований безопасности.

Условия безопасности при фиксированных выше величинах погрешностей выполняются, когда

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

и

$$S_1 - S_2 \geq S_{T2}(V_2) - S_{T1}(V_1) + [\Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_{T1}(V_1 + \Delta V_1) + \Delta S_{T2}(V_2 + \Delta V_2)]. \quad (3)$$

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

$$S_{\text{защ}} > \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_{T1}(V_1 + \Delta V_1) + \Delta S_{T2}(V_2 + \Delta V_2), \quad (4)$$

определенной величинами и знаками соответствующих погрешностей.

Условие безопасности (1), справедливое для идеальной системы, в случае с реальными измерительными трактами изменяется и имеет вид

$$S_1 - S_2 \geq S_{T2}(V_2) - S_{T1}(V_1) + S_{T2}(V_2) - S_{T1}(V_1) + S_{\text{защ}}. \quad (5)$$

Здесь следует отдельно отметить, что выбор длины  $S_{\text{защ}}$  непосредственно связан с доказательной базой, позволяющей найти максимальные величины соответствующих погрешностей.

При стохастическом подходе потребуются доказательства того, что вероятность выхода результата измерений за определенный диапазон не превышает регламентированной стандартом величины.

Итак, выбор допустимой скорости движения второго поезда должен осуществляться при управлении на конец защитного промежутка, который двигается вместе с «хвостом» идущего впереди поезда, с учетом (или без учета) пути его экстренного торможения.

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

$$T_s(S_0) = T_2(S_0) - T_1(S_0), \quad (6)$$

где  $T_1(S_0)$  и  $T_2(S_0)$  — моменты проследования «головы» соответственно первого и второго поездов точки  $S_0$ .

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

$$S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1)$$

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

$$T_2[S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1)] \geq T_1(S_1) + T_\theta, \quad (7)$$

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

$$S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1);$$

$T_1$  — момент времени, когда «хвост» первого поезда, который движется со скоростью  $V_1$ , находится в точке  $S_1$ ;

$T_\theta$  — время доставки второму поезду информации о координате «хвоста» и скорости первого поезда.

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

В неравенстве (7) координаты  $S_2$ ,  $S_1$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  — измеренные переменные, отличающиеся от истинных. Для компенсации влияния погрешностей и времени реакции машиниста (или поездного устройства системы автоведения) вводится  $\Phi_{\min}$  — факкультатив обычно равный 5 с для условий метрополитена.

Следовательно, согласно (7):

$$\Phi_{\min} \geq T_2 \left[ S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1) \right] - T_1(S_1) - T_\theta. \quad (8)$$

Если соответственно из левой и правой частей (6) вычесть левую и правую части (8) и перенести  $\Phi_{\min}$  в правую часть, получаем

$$T_u(S_0) \geq T_2(S_0) - T_1(S_0) + \Phi_{\min} + T_\theta + T_1(S_1) - T_2 \left[ S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1) \right]. \quad (9)$$

Поскольку интервал попутного следования  $T_u$  удовлетворяет условиям безопасности, если неравенство (9) выполняется при всех  $\geq S_0$ , величина  $T_{u \min}$  — минимальный интервал попутного следования определяется максимальным значением правой части (9):

$$T_{u \min} = \max_{S_1} \left\{ \Phi_{\min} + T_\theta + T_2(S_0) - T_2 \left[ S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1) \right] + T_1(S_1) - T_1(S_0) \right\}. \quad (10)$$

Точку с координатами  $S_1^*$  и соответственно  $V_1^*$ , в которой обеспечивается максимум правой части (9), будем называть



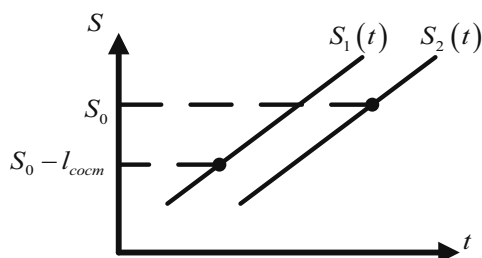


Рис. 1. Зависимость от времени  $t$  координаты  $S_1$  «хвоста» идущего впереди поезда и координаты  $S_2$  «головы» идущего сзади поезда при движении по перегону с постоянными скоростями  $V_1 = V_2 = V$ .

лимитирующей.

Необходимое условие максимума правой части неравенства (9) имеет вид

$$\frac{d}{dS_1} \left\{ \Phi_{\min} + T_0 - T_1(S_0) + T_1(S_1) - T_2 \left[ S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1) \right] \right\} = 0,$$

откуда

$$\frac{dT_1(S_1)}{dS_1} - \frac{dT_2 \left[ S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1) \right]}{dS_2} = 0, \quad (11)$$

$$\cdot \left[ 1 + \frac{dS_{T1}(V_1)}{dS_1} \right] = 0$$

и

$$\frac{V_2 [S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1)]}{1 + \frac{dS_{T1}(V_1)}{dS_1}} = V_1(S_1).$$

Положив в этом выражении  $S_{\text{защ}} = 0$ , получаем результат, совпадающий с соответствующим условием для идеальной системы обеспечения безопасности [2].

Оценим величину  $\frac{dS_{T1}(V_1)}{dS_1}$  у модели

равнозамедленного движения при замедлении экстренного торможения  $a_1$  от скорости  $V_1$ , обозначив через  $t$  время:

$$S_{T1}(V_1) = \frac{V_1^2(S_1)}{2a_1};$$

$$\frac{dS_{T1}(V_1)}{dS_1} = \frac{1}{2a_1} \times 2V_1(S_1) \frac{dV_1(S_1)}{dS_1} =$$

$$= \frac{1}{a_1} V_1(S_1) \frac{dV_1(S_1)}{dS_1} \frac{dS_1}{dS_1} =$$

$$= \frac{1}{a_1} \frac{dV_1(S_1)}{dS_1} \frac{1}{V_1(S_1)} V_1(S_1) = \frac{a_1}{a_1},$$

где

$$\frac{1}{V_1(S_1)} V_1(S_1) = \frac{a_1}{a_1},$$

и здесь

$$a_1 = \frac{dV_1(S_1)}{dS_1}$$

— ускорение идущего впереди поезда. Таким образом:

$$\frac{V_2 \left[ S_2 = S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V_2) + S_{T1}(V_1) \right]}{1 + \frac{a_1}{a_1}} = V_1(S_1). \quad (12)$$

Уравнение (12) совместно с заданными траекториями движения поездов позволяет определить координаты лимитирующей точки  $(S_1^*, V_1^*)$ .

Следуя методике, изложенной в [2], можно показать, что рассмотрение процесса экстренного торможения как равнозамедленного практически не вносит погрешности в вычисление  $T_{u \min}$ .

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ПЕРЕГОНУ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ

Фиксируемые зависимости от времени  $t$  координаты  $S_1$  «хвоста» идущего впереди поезда и координаты  $S_2$  «головы» идущего сзади поезда, двигающихся по перегону с постоянной скоростью, приведены на рис. 1.

Положение лимитирующей точки  $S_1^*$  и скорости  $V_1^*$  впереди идущего поезда в этой точке определяется из уравнения (11). Поскольку поезда движутся с постоянной скоростью  $V$ , то  $a_1 = 0$ . При этом  $V_2$

$= V_l = V^* = V$  и  $T_{u \min}$  не зависит от  $S_1$ . Положив в (11)  $S_0 = S_l + l_{\text{ост}}$  и  $V_1 = V_2 = V$ , получаем

$$\begin{aligned} T_{u \min} &= \Phi_{\min} + T_{\partial} + T_2(S_1 + l_{\text{ост}}) - \\ &- T_2[S_1 - S_{\text{защ}} - S_{T2}(V) + S_{T1}(V)] + \\ &+ T_1(S_1) - T_1(S_1 + l_{\text{ост}}) = \\ &= \Phi_{\min} + T_{\partial} + \frac{l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}} + S_{T2}(V) - S_{T1}(V)}{V}. \end{aligned} \quad (13)$$

Зависимости  $S_{T2}(V)$  и  $S_{T1}(V)$  могут быть получены из тяговых расчетов.

При модели равнозамедленного движения

$$S_{T2}(V) = \frac{V^2}{2\theta_{\text{сз}}}; \quad S_{T1}(V) = \frac{V^2}{2\theta_{\text{э}}},$$

где  $\theta_{\text{сз}}$  и  $\theta_{\text{э}}$  — соответственно замедление при служебном и экстренном торможении.

После подстановки  $S_{T2}(V)$  и  $S_{T1}(V)$  в (13) получаем

$$\begin{aligned} T_{u \min} &= \Phi_{\min} + T_{\partial} + \frac{l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}}}{V} + \\ &+ \frac{V}{2} \left[ \frac{1}{\theta_{\text{сз}}} - \frac{1}{\theta_{\text{э}}} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Увеличение величины минимального интервала попутного следования по сравнению с потенциально возможным для идеальной системы составляет

$$\Delta T_{u \min} = T_{\partial} + \frac{S_{\text{защ}}}{V}. \quad (15)$$

Исследуя на экстремум функцию  $T_{u \min}(V)$ , получим величину скорости  $V_{\text{опт}}$ , доставляющую минимум  $T_{u \min}$ :

$$\frac{dT_{u \min}}{dV} = -\frac{l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}}}{V^2} + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\theta_{\text{сз}}} - \frac{1}{\theta_{\text{э}}} \right] = 0 \text{ и}$$

$$V_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{2(l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}})}{\frac{1}{\theta_{\text{сз}}} - \frac{1}{\theta_{\text{э}}}}}; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} T_{\min \text{онм}} &= \Phi_{\min} + T_{\partial} + \\ &+ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2(l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}})}{\frac{1}{\theta_{\text{сз}}} - \frac{1}{\theta_{\text{э}}}}} \left[ \frac{1}{\theta_{\text{сз}}} - \frac{1}{\theta_{\text{э}}} \right] + \\ &+ \frac{l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}}}{\sqrt{\frac{2(l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}})}{\frac{1}{\theta_{\text{сз}}} - \frac{1}{\theta_{\text{э}}}}}}. \end{aligned} \quad (17)$$

При управлении по координате «хвоста» идущего впереди поезда  $V_2 \rightarrow \infty$  и

$$T_{u \min} = \Phi_{\min} + T_{\partial} + \frac{l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}}}{V} + \frac{V}{2\theta_{\text{сз}}}; \quad (18)$$

$$V_{\text{онм}} = \sqrt{2(l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}})\theta_{\text{сз}}}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} T_{\min \text{онм}} &= \Phi_{\min} + T_{\partial} + \\ &+ \frac{1}{2\theta_{\text{сз}}} \sqrt{2(l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}})\theta_{\text{сз}}} + \\ &+ \frac{l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}}}{\sqrt{2(l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}})}}. \end{aligned} \quad (20)$$

## ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ УХОДЯЩИМ СО СТАНЦИИ И ПРИБЫВАЮЩИМ ПОЕЗДАМИ

Пусть координата «головы» поезда, стоящего на станции (иначе — точки его остановки) равна  $S = l_{\text{ост}}$ . Тогда  $S = 0$  — координата «хвоста» этого поезда. Длительность стоянки обозначим  $T_{\text{ст}}$ . Второй поезд подходит к станции, как правило, на выезде. Его скорость с учетом ограничений на допустимое отклонение подъема или спуска от площади с нулевым профилем до 3% может быть принята постоянной и равной  $V_{2H}$ . Допущение постоянства  $V_{2H}$  будет использовано для упрощения расчетов  $T_{u \min}$ .

Интервал между первым и вторым поездами определим в точке  $S_0 = l_{\text{ост}}$  в соответствии с (6):

$$T_u = T_{20}(S_0 = l_{\text{ост}}) - T_{10}(S_0 = l_{\text{ост}}), \quad (21)$$

где  $T_{10}(S_0 = l_{\text{ост}})$  и  $T_{20}(S_0 = l_{\text{ост}})$  — моменты отправления первого и второго поездов со станции.

Так как  $T_{20}(S_0 = l_{\text{ост}}) = T_2(S_2 - l_{\text{ост}}) + T_{\text{ст}}$ , где  $T_2(S_2 = l_{\text{ост}})$  — момент остановки второго поезда на станции,  $T_{10}(S_0 = l_{\text{ост}}) = T_1(S_1 = 0)$ , где  $S_1$  — координата «хвоста» первого поезда, то

$$T_u = T_2(S_2 - l_{\text{ост}}) - T_1(S_1 = 0) + T_{\text{ст}}. \quad (22)$$

Скорость первого поезда в лимитирующей точке  $S_1^*$  определим из (12) при условии управления с учетом пути его экстренного торможения:

$$V_1(S_1^*) = \frac{V_{2H}}{1 + \frac{a_1}{\theta_{\text{э}}}}, \quad (23)$$

где  $a_1 = a_p$  — ускорение разгона уходящего поезда. Координата лимитирующей точки  $S_1^*$  может быть найдена из тяговых расчетов





как путь, пройденный поездом от момента трогания до скорости  $V_1^*$ . Координата, в которой «голова» второго может находиться в точке, соответствующей выполнению условия безопасности:

$$S_2^* = S_1^* - l_{\text{ост}} - S_{\text{защ}}. \quad (24)$$

Отсюда с очевидностью следует, что точка  $S_2^*$  (лимитирующая для второго поезда) находится в зоне подхода к станции.

При модели равноускоренного движения первого поезда

$$S_1^* = \frac{V_1^{*2}}{2a_p} \quad (25)$$

минимальный интервал в соответствии с (10):

$$T_{\text{u min}} = \Phi_{\text{min}} + T_{\text{cm}} + T_{\text{д}} + T_2(S_2 = l_{\text{ост}}) - T_2[S_1^* + S_{\text{защ}} + S_{T1}(V_1^*)] + T_1(S_1^*) - T_1(0). \quad (26)$$

Здесь учтено, что при  $S_0 = l_{\text{ост}}$  момент времени, когда «голова» первого поезда находится в точке  $S_0$ , его «хвост» расположен в точке, принятой за начало координат по пути  $S_0 - l_{\text{ост}} = 0$ , то есть  $T_1^r(S_0 - l_{\text{ост}}) = T_1(0)$ .

Преобразуем формулу (26) к виду, удобному для проведения расчетов с учетом допущения постоянной скорости  $V_{2H}$ :

$$T_{\text{u min}} = \Phi_{\text{min}} + T_{\text{cm}} + T_{\text{д}} + T_{1p}(V_1^*) + T_{2T}(V_{2H}) + \frac{(l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}} + S_{T2}(V_{2H}) - S_{2np}(V_{2H}) - (-S_{1p}(V_1^*) - S_{1\text{э}}(V_1^*)))}{V_{2H}}, \quad (27)$$

где  $T_{1p}(V_1^*) = T_1(S_1^*) - T_1(0)$  — время разгона уходящего со станции поезда до скорости  $V_1^*$ ;

$T_{2m}(V_{2H})$  — время прицельного торможения второго поезда, начиная от скорости  $V_{2H}$ ;

$S_{2np}(V_{2H})$  — путь прицельного торможения второго поезда от скорости  $V_{2H}$ ;

$S_{1p}(V_1^*)$  — путь разгона первого поезда до скорости  $V_1^*$ ;

$S_{1\text{э}}(V_1^*)$  — тормозной путь первого поезда в момент экстренного торможения при начальной скорости  $V_1^*$ .

Все величины, входящие в (27), могут быть получены из тяговых расчетов. Скорость  $V_1^*$  определяется по формуле (23).

При управлении по координате «хвоста» идущего впереди поезда путь его экстренного торможения принимается равным нулю. При этом  $\vartheta_{\text{г}} \rightarrow \infty$ ,  $V_1^* = V_{2H}$ , и из (27) следует:

$$T_{\text{u min}} = \Phi_{\text{min}} + T_{\text{cm}} + T_{\text{д}} + T_{1p}(V_{2H}) + T_{2T}(V_{2H}) + \frac{(l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}} + S_{T2}(V_{2H}) - (-S_{2np}(V_{2H}) - S_{1p}(V_{2H})))}{V_{2H}} \quad (28)$$

Если в (27) и (28) положить  $T_{\text{д}} = 0$ ;  $S_{\text{защ}} = 0$ , получаем выражение минимального временного интервала для идеальной системы [9]. Следовательно, выражение для вычисления минимального временного интервала при допущении о равнозамедленном движении поездов можно получить точно так же, как в [2], с учетом того, что  $T_{\text{д}} \neq 0$  и  $S_{\text{защ}} \neq 0$ :

$$S_{1p}(V_1^*) = \frac{V_1^{*2}}{2a_p}, \quad S_{1\text{э}}(V_{2H}) = \frac{V_1^{*2}}{2\vartheta_{\text{э}}};$$

$$T_{1p}(V_1^*) = \frac{V_1^{*2}}{2a_p}; \quad S_{2np}(V_{2H}) = \frac{V_1^{*2}}{2\vartheta_{\text{np}}};$$

$$T_{2T}(V_{2H}) = \frac{V_1^*}{\vartheta_{\text{np}}}; \quad S_{T2}(V_{2H}) = \frac{V_{2H}^2}{\vartheta_{\text{сл}}},$$

где  $\vartheta_{\text{np}}$  и  $\vartheta_{\text{сл}}$  — соответственно замедление при прицельном и служебном торможении второго поезда.

Подставив эти выражения в формулы для минимального интервала (27) и (28), получаем:

— при управлении с учетом пути экстренного торможения идущего впереди поезда

$$T_{\text{u min}} = T_{\text{cm}} + \Phi_{\text{min}} + T_{\text{д}} + \frac{l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}}}{V_{2H}} + \frac{V_{2H}}{2\vartheta_{\text{np}}} + \frac{V_{2H}}{2a_p \left(1 + \frac{a_p}{\vartheta_{\text{э}}}\right)} + \frac{V_{2H}}{2\vartheta_{\text{сл}}}; \quad (29)$$

— при управлении по координате «хвоста» идущего впереди поезда ( $\vartheta_{\text{э}} \rightarrow \infty$ )

$$T_{\text{u min}} = T_{\text{cm}} + \Phi_{\text{min}} + T_{\text{г}} + \frac{l_{\text{ост}} + S_{\text{защ}}}{V_{2H}} + \frac{V_{2H}}{2\vartheta_{\text{np}}} + \frac{V_{2H}}{2a_p} + \frac{V_{2H}}{2\vartheta_{\text{сл}}}. \quad (30)$$

Учитывая погрешность  $\Delta V_{2H}$  измерения  $V_{2H}$  при условии, что  $\Delta V_{2H} \ll V_{2H}$ :

$$\Delta T_{u \min} = \left[ -\frac{l_{\text{сост}} + S_{\text{защ}}}{V_{2H}^2} + \frac{1}{2\theta_{np}} + \frac{1}{2\theta_{cl}} + \frac{1}{2a_p \left(1 + \frac{a_p}{\theta_s}\right)} \right] \Delta V_{2H} \ll$$

$$\ll \left[ \frac{l_{\text{сост}} + S_{\text{защ}}}{V_{2H}^2} + \frac{1}{2\theta_{np}} + \frac{1}{2\theta_{cl}} + \frac{1}{2a_p \left(1 + \frac{a_p}{\theta_s}\right)} \right] \Delta V_{2H} =$$

$$= \left[ \frac{l_{\text{сост}} + S_{\text{защ}}}{V_{2H}} + \frac{V_{2H}}{2\theta_{np}} + \frac{V_{2H}}{2a_p \left(1 + \frac{a_p}{\theta_s}\right)} + \frac{V_{2H}}{2\theta_{cl}} \right] \frac{\Delta V_{2H}}{V_{2H}}.$$

Минимальный интервал попутного следования можно оценивать как сумму  $T_{u \min} + \Delta T_{u \min}$ .

Анализ выражения (29) показывает возможность определения оптимальной скорости подхода к станции по критерию минимума межпоездного интервала:

$$\frac{dT_{u \min}}{dV_{2H}} = 0 \text{ при}$$

$$V_{2H_{\text{opt}}} = \sqrt{\frac{l_{\text{сост}} + S_{\text{защ}}}{\frac{1}{2\theta_{np}} - \frac{1}{2a_p \left(1 + \frac{a_p}{\theta_s}\right)} + \frac{1}{2\theta_{cl}}}}. \quad (32)$$

При управлении по координате «хвоста» уходящего поезда ( $\theta_s \rightarrow \infty$ ):

$$H_{2H_{\text{opt}}} = \sqrt{\frac{l_{\text{сост}} + S_{\text{защ}}}{\frac{1}{2\theta_{np}} + \frac{1}{2a_p} + \frac{1}{\theta_{cl}}}}. \quad (33)$$

## ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЯ

Пути  $T$  – длительности доставки сообщения идущему сзади поезду при отсутствии отказа декодирования,  $P$  – вероятности отказа от декодирования одного сообщения. Вероятность того, что длительность доставки  $T_\theta$  равна  $T$ , определяется выражением

$$P(T_\theta = T) = 1 - P.$$

Вероятность того, что длительность доставки  $T_\theta$  равна  $iT$ :

$$P(T_\theta = iT) = (1 - P) P^{i-1} \quad i = 1, 2, \dots$$

Отсюда среднее время доставки:

$$\bar{T}_\theta = \sum_{i=1}^{\infty} iT(1 - P)P^{i-1} = \frac{T}{1 - P}.$$

Дисперсия случайной величины  $T_\theta$ :

$$\bar{T}_\theta^2 = \sum_{i=1}^{\infty} (iT - \frac{T}{1 - P})^2 (1 - P)P^{i-1} = \frac{PT^2}{(1 - P)^2}.$$

Вероятность того, что время доставки сообщения не превысит  $nT$ :

$$P(T_\theta \leq nT) = \sum_{i=1}^n P^{i-1} (1 - P) = 1 - P^n.$$

В том случае, если в алгоритме функционирования СОБД заложен механизм допустимого тайм-аута – то есть времени отсутствия обновления информации, по истечении которого система переходит в состояние защитного отказа, максимальное время доставки информации может быть равным  $T_\theta = nT$ . Выбор величины  $nT$  исходит из допустимой вероятности  $P(T_\theta > nT) = P^n$ .

Таким образом, минимальный интервал попутного следования по условиям безопасности движения существенно зависит от качества радиоканала передачи информации.

Пусть  $T = 0,3$  с,  $P = 10^{-4}$ . Тогда при  $n = 5$  величина  $P(T_\theta > nT) = 10^{-20}$  и

$$T_\theta = 5T = 1,5 \text{ с}. \quad (34)$$

В качестве примера возьмем расчет  $T_{u \min}$  для перегона, на котором в часы «пик» скорость подхода к станции  $V_{2H} = 45$  км/ч, эксплуатируемый подвижной состав имеет длину  $l_{\text{сост}} = 176$  м,  $a_p = 0,8$  м/с<sup>2</sup>,  $\theta_{cl} = 0,85$  м/с<sup>2</sup>,  $\theta_{np} = 0,8$  м/с<sup>2</sup>, длина защитного промежутка  $S_{\text{защ}} = 100$  м, относительная погрешность измерения скорости не превышает 1,5%,  $\Phi_{\min} = 5$  с, время доставки сообщения в соответствии с (34) равно 1,5 с, длительность стоянки  $T_{\text{cm}} = 25$  с, управление осуществляется по координате «хвоста» идущего впереди поезда (т. е.  $\theta_s \rightarrow \infty$ ).

Вычисление  $\Delta T_{u \min}$  выполняется по формуле (31) при заданных исходных данных. В результате получаем  $\Delta T_{u \min} = 0,68$  с. При модели равноускоренного движения находим время по формуле (30):  $\Delta T_{u \min} = 79$  с. Следовательно, интервал попутного следования может быть принят равным  $79 \text{ с} + 0,68 \text{ с} = 79,68 \text{ с} \approx 80$  с, что на 12 с больше, чем минимальный интервал в «идеальной системе».

Относительная разность величин минимальных интервалов, рассчитываемых по точным и приближенным формулам (модели равноускоренного движения), при скорости подхода к станции от 40 до 30 км/ч не превышает 4,2%.







## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами теоретических расчетов, если суммировать содержание статьи, являются аналитическая оценка минимального интервала попутного следования поездов при построении систем обеспечения безопасности на базе радиоканала (класса СВТС), оценка величины минимального интервала по сравнению с минимально возможной потенциальной оценкой для «идеальной системы», анализ причин, влияющих на увеличение минимального интервала попутного следования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Л. А., Головичер Я. М., Ерофеев Е. В., Максимов В. М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1990. — 272 с.
2. Баранов Л. А., Балакина Е. П., Воробьева Л. Н. Алгоритмы централизованного управления для поездов метрополитена // Мир транспорта. — № 2. — 2007. — С. 104–113.

3. Бестемьянов П. Ф., Романчиков А. М. Методика оценки качества управления при координатном способе интегрального регулирования // Наука и техника транспорта. — 2008. — № 1. — С. 71–74.

4. Бестемьянов П. Ф., Романчиков А. М. Контроль движения при координатном регулировании // Мир транспорта. — 2008. — № 1. — С. 104–108.

5. 1474.1–2004 – IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements. Электронный ресурс <https://standards.ieee.org/findstds/standard/1474.1–2004.html> Доступ 5.05.2015.

6. Pascoe, R. D.; Eichorn, T. N. What is communication-based train control? Vehicular Technology Magazine, IEEE (Volume:4, Issue: 4), 2009. pp. 16–21. DOI: 10.1109/MVT.2009.934665.

7. Cheptsov, M. N., Tsykhmistro, S. I., Boinik, A. B., Bakhal, I. G. Project NEAR – Network of European/Asian Rail Research Capacities (Signalling Systems). Збірник наукових праць ДонІЗТ, 2013, № 36, pp. 106–119.

8. Маргарен С. Радиосети перспективных автоматизированных систем управления поездами // Беспроводные технологии. — 2014. — № 1. — С. 23–35.

9. Баранов Л. А. Потенциальная оценка интервала попутного следования поездов и управления движением // Вестник МИИТ. — 2007. — № 17. — С. 3–14. ●

Координаты автора: Баранов Л. А. – [baranov.miit@gmail.com](mailto:baranov.miit@gmail.com).

Статья поступила в редакцию 02.03.2015, принята к публикации 15.04.2015.

## EVALUATION OF METRO TRAIN SUCCESSION TIME FOR SAFETY SYSTEMS BASED ON RADIO CHANNEL

*Baranov, Leonid A., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.*

### ABSTRACT

Improving safety of metro trains in conditions of growing intensity of passenger traffic requires improvement of management, a combination of automation and systems of information exchange by radio channel. The article substantiates with theoretical

calculations the possibility of estimating minimum succession time for trains passing along metro lines, equipped with a safety system and information means of a class Communications-Based Train Control (CBTC). The base is the author's method that compares values obtained with potential values of a «perfect system».

*Keywords:* underground, metro, train, succession time, traffic safety system, analytical assessment, methods, mathematical calculation, algorithm, radio channel, information.

**Background.** Meeting the requirements of comfort and safety of passenger transportation, especially in the high-intensity schedule involves improving systems of automatic or automated train traffic control. System of dispatch control, centralized automatic driving system, security systems should have a single unifying origin [1, 2].

**Objective.** The objective of the author is to provide theoretical calculations and justification for estimating minimum succession time for trains, operating, mainly, in metro.

**Methods.** The author uses engineering and mathematical methods, analysis, coordinate method.

### Results.

#### General provisions

Implementation of high traffic intensity is associated with the need to have sufficient power of traction substations, reduction of traction networks resistance and increase in level of their protection, ability to distinguish between comparable load currents and remote short-circuit that are more and

more important with increasing power of modern rolling stock.

Compliance with restrictions associated with power supply of given traffic intensity sets a task of implementing required succession time by safety systems and station centralization. On the domestic underground a system of automatic locking ARS- ALS is successfully operated, track circuits are used as train positioning sensors, detectors of running rails integrity, determinants of block section occupancy [3, 4]. However, application of systems to ensure traffic safety on the basis of the radio channel (class CBTC–Communications-Based Train Control) is widely debated [5]. Their obvious advantage is a lack of fixed block sections, as well as track circuits, for noise immunity of which filtering of noise resulting in traction drives and power installations is required.

However, systems of class CBTC do not provide control of running rails integrity, which is an obstacle to their use. To remove this obstacle, options are considered for development of individual control