

У. Экологическая и техногенная безопасность

DOI: 10.25728/iccss.2022.39.49.039

**Баранов Л.А., Бестемьянов П.Ф., Балакина Е.П.,
Пудовиков О.Е.**

Методика выбора длины виртуальной сцепки по требованиям безопасности в интеллектуальных системах управления движением поездов

Аннотация: Рассматривается использование соединения двух поездов для повышения провозной и пропускной способности железнодорожных линий с помощью виртуальной сцепки. Расстояние между «головой» сзади идущего поезда и «хвостом» впереди идущего называется «длиной виртуальной сцепки», зависящей от режимов движения поездов. Методика расчёта безопасной длины виртуальной сцепки в реальном времени представлена в данной работе.

Ключевые слова: виртуальная сцепка, длина виртуальной сцепки, экстренное торможение, служебное торможение, погрешности измерения координат и скоростей, верхние оценки, условия безопасности

В настоящее время для увеличения провозной и пропускной способности железнодорожных линий, как одно из возможных направлений, рассматривается использование так называемой «виртуальной сцепки». При этом по радиоканалу впереди идущим (первым) поездом передается сзади идущему (второму) поезду информацию о своей координате и скорости. Второй поезд выбирает режим движения таким образом, чтобы при экстренном торможении первого поезда не произошло аварийного столкновения. Расстояние между «хвостом» первого и «головой» второго будем называть «длиной виртуальной сцепки». Используемая терминология «виртуальная сцепка» связана с известной ранее технологией

вождения соединённых поездов, имеющих физическую сцепку локомотива второго поезда с последним вагоном первого. В технологии виртуальной сцепки отсутствует необходимость в разъединения поездов перед их входом на станцию, где длина станционных путей меньше длины соединённого поезда.

При виртуальной сцепке система управления, имея результаты измерения координаты и скорости второго поезда и получая по радиоканалу результаты измерения координаты и скорости первого поезда, должна вычислять допустимую по условиям безопасности длину виртуальной сцепки и автоматически выбирать управление вторым поездом, обеспечивающее реализацию этой длины. Очевидно, что при минимальной длине виртуальной сцепки в том случае, когда выполняются требования безопасности движения, можно получить максимальную провозную способность рассматриваемого участка железнодорожной линии при условии выполнения технических и технологических ограничений [1-4].

1. Задача определения длины виртуальной сцепки

Условие обеспечения безопасности движения виртуального сцепления поездов выполняется, если

$$L(t) = S_1(t) - S_2(t) - l \geq S_{2слторм}[V_2(t)] - S_{1эторм}[V_1(t)], \quad (1)$$

где t – текущее время,

L – длина виртуальной сцепки,

l – длина первого поезда,

$S_1(t)$ – координата «головы» первого поезда в момент времени t ,

$S_2(t)$ – координата «головы» второго поезда в момент времени t ,

$S_{1эторм}(V_1)$ – путь экстренного торможения первого поезда, движущегося в момент времени t со скоростью V_1 ,

$S_{2слторм}(V_2)$ – путь служебного торможения второго поезда, движущегося в момент времени t со скоростью V_2 .

Очевидно, что неравенство (1) записано для идеальных условий отсутствия методических и инструментальных погрешностей измерения координат и скоростей движения поездов, отсутствия погрешностей от запаздывания, вызванных конечным временем передачи информации о координате и скорости первого локомотива,

отсутствия разброса путей служебного и экстренного торможения, погрешности в заданной длине l первого поезда.

Для учёта перечисленных погрешностей при формализации задачи определения длины виртуальной сцепки перейдем к дискретному времени, обозначив $t = (m + \varepsilon)T$ для первого поезда, $t = (n + \varepsilon)T$ для второго поезда, где $m = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq \varepsilon \leq 1$, T – шаг временной дискретизации, определяемый временем необходимым для передачи информации о координате и скорости первого поезда второму. В течение времени T происходит цифровое измерение координат поездов и их скорости. В частности, величина T для передачи 24 байт информации составляет 140 мс для радиоканала 160 мГц, 70 мс для радиоканала 2130 мГц. Время цифрового измерения скоростей и координат поездов соответствует этому шагу временной дискретизации. Наличие двух переменных m и n при обозначении текущего времени вызвано тем, что цифровое измерение координаты и скоростей для первого и второго поезда не синхронизировано.

Информация, полученная вторым поездом в момент mT соответствует информации, передаваемой первым поездом в момент $(m - 1)T$, и используется для вычисления T на втором локомотиве при $t = nT$.

Тогда погрешность, вносимая запаздыванием, составляет

$$\Delta S_1[nT] = S_1[nT] - S_1[(n - 2 + \varepsilon_1)T] \quad (2)$$

Выражение (2) получено при условии, что при передаче по радиоканалу случай отказа приемником от декодирования полученной информации при обнаружении ошибок отсутствуют и трансформация кодовых комбинаций невозможна. Использование современных методов избыточного кодирования позволяет получить вероятность трансформации порядка 10^{-14} . Вероятность отказа от декодирования значительно выше и это следует учитывать при расчёте погрешности от запаздывания. При отказе от декодирования k подряд кодовых серий погрешность от запаздывания составляет

$$\Delta S_1[nT] = S_1[nT] - S_1[(n - 2 - k + \varepsilon_1)T] \quad (3)$$

Максимальная величина погрешности от запаздывания достигается при $\varepsilon_1 = 0$ и $k = k_{\max}$, где k_{\max} выбирается из

нормированной, согласно SIL4, допускаемой вероятности отказа от декодирования k подряд кодовых серий, что может привести к опасным последствиям. Пусть P - вероятность отказа от декодирования одной кодовой серии, события отказа от декодирования кодовых серий статистически независимы. Тогда вероятность того, что при приёме первых подряд k кодовых серий приёмник откажется от декодирования, после чего будет достоверно принята кодовая серия при условии, что вероятность трансформации пренебрежимо мала, составит $P^k(1 - P)$. Если P_n - нормированная допустимая вероятность подряд не принятых кодовых серий, то k_{max} вычисляется из выражения $P_n = P^{k_{max}}(1 - P)$.

Аналогично выражению (3) погрешность от запаздывания результатов измерения скорости определяется следующей формулой

$$\Delta V_1[nT] = V_1[nT] - V_1[(n - 2 - k + \varepsilon_1)T] \quad (4)$$

Соответствующие максимальные значения погрешностей от запаздывания, связанные с передачей информации по радиоканалу составляют

$$\Delta S_{1,k}^{max}[nT] = S_1[nT] - S_1[(n - 2 - k_{max})T] \quad (5)$$

$$\Delta V_{1,k}^{max}[nT] = V_1[nT] - V_1[(n - 2 - k_{max})T] \quad (6)$$

Обозначим максимальные значения модуля инструментальной погрешности измеренных координат поездов как ΔS_{1a}^{max} и ΔS_{2a}^{max} .

Тогда максимальные значения погрешностей измерения координат соответственно первого и второго поездов, определяются выражениями

$$\Delta S_{1\ max} = \Delta S_{1a}^{max} + \Delta S_1^{max}[nT] \quad (7)$$

$$\Delta S_{2\ max} = \Delta S_{2a}^{max} \quad (8)$$

При цифровом измерении скорости поездов по частоте вращения колёсной пары локомотива имеют место методические и инструментальные погрешности. Методические погрешности определяются квантованием по уровню при цифровом измерении и погрешностью от запаздывания на $\frac{T_v}{2}$, где $T_v \leq T$ - время измерения

скорости. Обозначим сумму инструментальных и методических погрешностей измерения скоростей соответственно первого и второго поездов как ΔV_{1a}^{max} и ΔV_{2a}^{max} .

Тогда максимальные значения погрешностей измерения скоростей соответственно первого и второго поездов определяются выражением

$$\Delta V_{1\ max} = \Delta V_{1a}^{max} + \Delta V_1^{max}[nT], \quad (9)$$

$$\Delta V_{2\ max} = \Delta V_{2a}^{max}. \quad (10)$$

Оценим далее сверху величины погрешностей от запаздывания $\Delta S_1^{max}[nT]$ и $\Delta V_1^{max}[nT]$.

За время запаздывания информации о координате первого поезда $nT - (n - 2 - k_{max})T = (k_{max} + 2)T$ путь пройденным первым поездом при $V_1 = V_{max}$ составляет $(k_{max} + 2)TV_{1\ max}$, что является верхней оценкой погрешности $\Delta S_1^{max}[nT]$. Эта погрешность не приводит к уменьшению допустимой по условиям безопасности длины виртуальной сцепки – L . Вместе с тем за время $(k_{max} + 2)T$ скорость первого поезда уменьшаться, что в свою очередь приводит к уменьшению пути экстренного торможения первого поезда, непосредственно влияющего на выбор L . Худшей с точки зрения выполнения условий безопасности будет ситуация, когда за время $(k_{max} + 2)T$ скорость первого поезда уменьшается с замедлением g_{max} , которое можно принять равным замедлению экстренного торможения $g_э$. Тогда путь экстренного торможения первого поезда при известном в момент nT второму поезду измеренном значении скорости первого поезда в момент $(n - 2 + k_{max})T$ можно оценить как

$$\begin{aligned} S_{э\ торм1} \{V_{изм}[n] - \Delta V_{1a}^{max} - (2 + k_{max})Tg_э\} &= \\ &= \frac{\{V_{изм}[n] - \Delta V_{1a}^{max} - (2 + k_{max})Tg_э\}}{2g_э} \quad (11) \end{aligned}$$

Таким способом оценивается влияние максимального значения погрешности $\Delta V_1^{max}[nT] = (k + 2)Tg_э$ от запаздывания при передаче информации скорости движения первого поезда.

2. Оценка длины виртуальной сцепки

В момент времени $t = nT$ вычислитель второго поезда определяет допустимую по условиям безопасности длину виртуальной сцепки как разность путей служебного торможения второго поезда и экстренного торможения первого поезда с учётом заданной погрешности Δl длины первого поезда и погрешностей измерения координат поездов. Путь служебного торможения второго поезда, движущегося со скоростью $V_{2изм}[n] + \Delta V_{2a}^{max}$ можно оценить, как

$$S_{\text{торм сл 2}} \{V_{2изм}[nT] + \Delta V_{2a}^{max}\} = \frac{\{V_{изм}[nT] + \Delta V_{2a}^{max}\}^2}{2 g_{сл}} \quad (12)$$

Путь экстренного торможения первого поезда, вычисляемый в момент времени nT с учётом возможного уменьшения скорости за время $(k + 2)T$ можно оценить по формуле (11).

Допустимая по условиям безопасности длина виртуальной сцепки определяется как

$$L[nT] = \frac{(V_{2изм}[nT] + \Delta V_{2a}^{max})^2}{2g_{сл}} + \Delta S_{1a}^{max} + \Delta S_{2a}^{max} + \Delta l - \frac{[V_{1изм}[nT] - \Delta V_{1a}^{max} - g_{э}(k + 2)T]^2}{2g_{э}} \quad (13)$$

Это выражение преобразуем к виду

$$L[nT] = \frac{V_{2max}^2[nT]}{2g_{сл}} - \frac{V_{1max}^2[nT]}{2g_{э}} + L_0 + L_1, \quad (14)$$

где $L_0 = +\Delta S_{1a}^{max} + \Delta S_{2a}^{max} + \Delta l + \frac{(\Delta V_{2a}^{max})^2}{2g_{сл}}$;

$$L_1[nT] = V_{2изм}[nT] \frac{\Delta V_{2a}^{max}}{2g_{сл}} + V_{1изм}[nT] \frac{\Delta V_{1a}^{max} + g_{э}(k + 2)T}{2g_{э}}$$

Величину $L_1[nT]$ можно оценить сверху как L_1^* , приняв $V_{2изм}[nT] = V_{2max}$; $V_{1изм}[nT] = V_{1max}$, где V_{1max} и V_{2max} – максимально допустимые скорости движения соответственно первого и второго поездов

$$L_1^* = \frac{V_{2max}\Delta V_{2a}^{max}}{2g_{cl}} + \frac{V_{1max}[\Delta V_{1a}^{max} + g_3(k+2)T]}{2g_3} \quad (15)$$

Тогда оценка длины виртуальной сцепки $L[nT]$ по условиям безопасности

$$L[nT] = \frac{V_{2изм}^2[nT]}{2g_{cl}} - \frac{V_{1изм}^2[nT]}{2g_3} + L_0 + L_1^* \quad (16)$$

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund «Talent and success», project number 20-37-51001

Литература:

1. Бушуев С.В., Гундырев К.В., Голочалов Н.С. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки // Автоматика на транспорте. – 2021. – №1. – С. 7-20.

2. Flammini F., Marrone S., Nardone R., Petrillo A., Santini S., Vittorini V. Towards Railway Virtual Coupling. – International Conference of Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, 2018. – P. 1-6. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.860752

3. Mitchell I., Goddard E., Montes F., Stanley P., Muttram R., Coenraad W., Pore J., Andrews S., Lochman L. ERTMS Level 4, Train Convoys or Virtual Coupling. – Institution of railway signal engineers, IRSE news issue 219. – 2016.

4. Goikoetxea J. Roadmap Towards the Wireless Virtual Coupling of Trains / Part of the Lecture Notes in Computer Science book series (LNCCN, volume 9669). – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – P. 3-9.