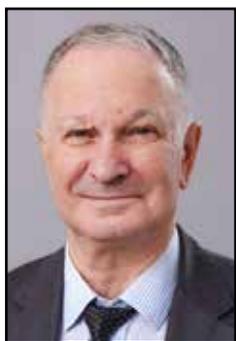




Сравнительная оценка параметров движения поездов для различных вариантов виртуальной сцепки



Ефим РОЗЕНБЕРГ



Алексей ОЗЕРОВ



Валерий КУЗНЕЦОВ



Сергей ТИХОНОВ

Ефим Наумович Розенберг¹, Алексей Валерьевич Озеров², Валерий Иванович Кузнецов³, Сергей Сергеевич Тихонов⁴

^{1, 2, 3, 4} АО «Научно-исследовательский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия.

✉ ² a.ozarov@vniias.ru.

¹ SPIN-код 5648-5186.

² SPIN-код 4102-5984, Scopus ID 57210556089, ORCID 0000-0001-5057-9821.

АННОТАЦИЯ

В условиях инфраструктурных ограничений, в том числе с учётом растущего грузооборота на Восточном полигоне, крайне востребованы новые принципы интервального регулирования движения поездов, которые позволяют увеличить пропускную и провозную способность.

Наиболее предпочтительным вариантом на данный момент является интервальное регулирование на основе технологии виртуальной сцепки, который позволяет по расчётам обеспечить увеличение пропускной и провозной способности до 20 % относительно классической технологии использования жёсткой сцепки. При этом пока отсутствуют методики определения вариантов применения технологии виртуальной

сцепки для конкретных участков железной дороги, подкреплённые математическими расчётами.

В статье рассмотрены пять вариантов применения виртуальной сцепки поездов для участков с ограничением скорости движения и представлены графические оценки пропускной способности для различных скоростей движения и длин участков ограничения скорости. Сделан вывод о целесообразности применения виртуальной сцепки поездов для повышения пропускной способности на участках с инфраструктурными ограничениями, а также о необходимости проведения дальнейшего исследования для обоснования практических методик её применения.

Ключевые слова: железная дорога, интервальное регулирование движения поездов (ИРДП), радиоканал, виртуальная сцепка (ВСЦ), пропускная способность.

Для цитирования: Розенберг Е. Н., Озеров А. В., Кузнецов В. И., Тихонов С. С. Сравнительная оценка параметров движения поездов для различных вариантов виртуальной сцепки // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 4 (107). С. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-4>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение пропускной и провозной способности железнодорожных магистралей при безусловном обеспечении безопасности перевозок является неизменной стратегической задачей железнодорожного транспорта, которая решается с помощью внедрения современных технологий интервального регулирования движения поездов (ИРДП) [1]. К перспективным вариантам ИРДП относится технология виртуальной сцепки (ВСЦ). Она представляет собой соединение локомотивов последовательно следующих поездов по радиоканалу, при котором ведение второго («ведомого») поезда осуществляется с учетом информации о скорости и показаниях локомотивного светофора первого («ведущего») поезда [2].

В ОАО «РЖД» проделана большая работа в вопросах практического тестирования технологии ВСЦ и накоплен значительный опыт. Впервые технология виртуальной сцепки была апробирована и испытана в 2019 году на участке Дальневосточной железной дороги Хабаровск – Ружино протяженностью 400 км [3]. К настоящему моменту выполнено около 30 тыс. поездок в режиме «виртуальная сцепка», при этом полигон внедрения технологии до конца 2023 года должен составить около 6 тыс. км. Технология ВСЦ крайне востребована на всем Восточном полигоне. Расчетами выявлено, что при введении технологии интервального регулирования по технологии ВСЦ пропускная способность железнодорожной линии может увеличиваться практически на 20 % относительно существующего графика движения с использованием сдвоенных поездов [4].

При этом, как и любая новая технология, она нуждается в углубленном изучении, в том числе с учётом возможных инфраструктурных ограничений и различных вариантов её применения. В АО «НИИАС» такая работа ведется в рамках отработки комплексного подхода к решению задач повышения пропускной способности, в том числе с использованием средств компьютерного моделирования [5].

Следует отметить, что на железных дорогах других стран данная технология пока не до конца отработана технически и не применяется на магистральном железнодорожном транспорте, но изучается в научно-исследовательских проектах и работах как перспективный вариант развития системы ИРДП на

основе радиосвязи типа системы ERTMS уровень 3 [6–10]. В ряде европейских исследований приведены результаты анализа влияния на пропускную способность возможного применения ВСЦ на базе аппаратуры ERTMS в сравнении с применением типовой системы ERTMS уровень 2, а также в сравнении с возможным применением в будущем системы ERTMS уровень 3 с подвижными блок-участками. Выводы, основанные на результатах моделирования, свидетельствуют о значительном потенциале данной технологии [11–13].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Существуют два варианта реализации ВСЦ – организация радиоканального обмена данными по принципу «поезд-поезд» или обмен данными через центр радиоблокировки RBC. В ОАО «РЖД» на текущий момент используется первый вариант, поскольку в этом случае не требуется масштабное строительство центров радиоблокировки [14].

В настоящей статье представлены некоторые оценки пропускной способности для различных вариантов виртуальной сцепки при движении поездов на участках с ограничением скорости движения (см. рис. 1).

На рисунке обозначены:

t_0 – начало движения первого поезда;

t_1 – начало движения второго поезда;

t_2 – момент достижения первым поездом границы участка с ограничением скорости движения – момент начала движения первого поезда с ограниченной скоростью;

t_3 – момент начала движения второго поезда с ограниченной скоростью;

t_4 – момент достижения вторым поездом границы участка с ограничением скорости движения;

t_5 – момент выхода первого поезда за границу участка с ограничением скорости движения – момент начала задержки движения первого поезда с установленной скоростью;

t_6 – момент начала движения первого поезда с установленной скоростью после выхода за границу участка с ограничением скорости движения;

t_7 – момент выхода второго поезда за границу участка с ограничением скорости движения;

S_1 – начальная граница участка с ограничением скорости движения;

S_2 – конечная граница участка с ограничением скорости движения;



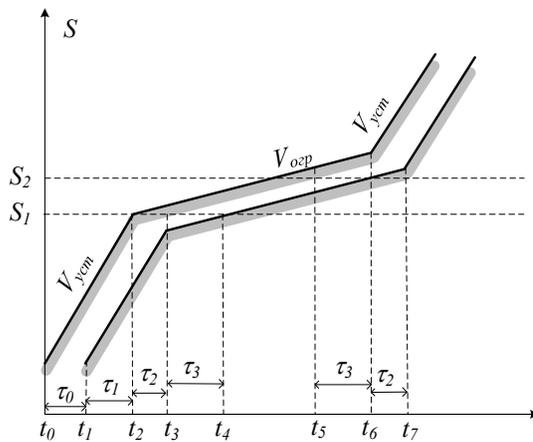


Рис. 1. Схематическое изображение расстояния между поездами при прохождении участка пути с ограничением скорости движения [выполнено авторами].

$V_{огр}$ – ограниченная скорость движения;
 $V_{уст}$ – установленная скорость движения,
 а также соответствующие временные отрезки τ_0, \dots, τ_3 .

В виде теневой закрашки условно показана длина поезда L_{II} .

На рис. 1 обозначен временной отрезок $\tau_3 = [t_5, t_6]$, на котором должна выполняться задержка начала движения первого поезда с установленной скоростью после его выхода с участка ограничения скорости движения.

Исходим из того, что рассматриваемый характер движения обладает симметрией: взаимное положение поездов перед участком с ограничением скорости движения соответствует взаимному положению поездов после участка с ограничением скорости движения. Это означает, что искомая величина определяется равенствами:

$$\tau_3 = t_6 - t_5 = t_4 - t_3,$$

что упрощает проведение последующего анализа, который сводится к следующему:

– первоначально необходимо определить временной отрезок $\tau_2 = t_3 - t_2$, на котором второй поезд сокращает межпоездной интервал от $Z_{уст}$ до $Z_{мин}$, что может быть описано следующим образом:

$$L + Z_{уст} + V_{огр} \cdot \tau_2 = L + Z_{мин} + V_{уст} \cdot \tau_2;$$

– определить оценку интересующей величины:

$$\tau_2 = \frac{Z_{уст} - Z_{мин}}{V_{уст} - V_{огр}}.$$

Необходимо обратить внимание, что при различных соотношениях временных показателей, скоростей, установленных межпоездных интервалов и длины участка ограничения скорости движения $S_{огр} = S_2 - S_1$ возможны

ситуации, когда второй поезд не успевает достигнуть граничного значения $Z_{мин}$ (см. рис. 2). В этом случае (в силу симметрии рассматриваемого движения) не возникает необходимости в задержке начала движения первого поезда с установленной скоростью после его выхода с участка ограничения скорости движения.

Формально такой исход описывается следующей зависимостью

$$Z_{уст} - (V_{уст} - V_{огр}) \cdot \tau_0 + V_{уст} \cdot \tau' > Z_{мин}, \quad (1)$$

где τ' – время движения первого поезда с установленной скоростью $V_{уст}$ до момента достижения вторым поездом участка ограничения скорости движения.

В последнем соотношении (1) учтено, что $\tau_0 = \tau_2$, поскольку интервал выхода поездов соответствует интервалу их прихода к границе участка ограничения скорости движения.

Другими словами, если выполнено неравенство (1), временная задержка τ_3 принимает нулевое значение.

Для последующего сравнения получаемых оценок первоначально определяется пропускная способность при отсутствии участков ограничения скорости и виртуальной сцепки (вариант эталонный), а также в случаях, когда имеются участки ограничения скорости движения и различные варианты виртуальной сцепки – варианты 1–5.

Эталонный вариант. Для эталонного варианта приняты следующие исходные данные:

- нет участков ограничений скорости,
- отправление поездов производится с интервалом $t_{уст}$ мин.;
- виртуальная сцепка отсутствует.

Количество поездов в сутки (22 часа) определяется по известному соотношению¹ следующим образом:

$$n = T / I, \quad (2)$$

где T – время, час; I – интервал следования поездов, час.

Вариант 1. Для первого варианта приняты следующие исходные данные:

- имеется $N_{\text{уч. огр}}$ участков ограничения скорости движения;
- отправление поездов производится с интервалом $t_{\text{уст}}$ мин.;
- поезда движутся с сохранением временного интервала между ними.

Для этого варианта является характерным то, что на каждом участке ограничения скорости возникает временная задержка, определяемая следующим выражением:

$$\Delta I = \frac{L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}}} - \frac{L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}}{V_{\text{уст}}} = \frac{V_{\text{уст}} - V_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot (L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}). \quad (3)$$

Такая временная задержка (3) влияет на время прохождения участка дороги, но не оказывает влияния на временной интервал между поездами на выходе с участка.

В связи с этим общее количество поездов в сутки будет определяться соотношением, учитывающим временные потери, возникающие при движении первого поезда:

$$n_1 = \frac{T - N_{\text{уч. огр}} \cdot \Delta I}{T} \cdot n = \frac{T - N_{\text{уч. огр}} \cdot \Delta I}{T} \cdot \frac{T}{I} = \frac{T - N_{\text{уч. огр}} \cdot \Delta I}{I}, \quad (4)$$

где $N_{\text{уч. огр}}$ – количество участков ограничения скорости движения.

Вариант 2. Этот вариант предполагает увеличение количества отправляемых поездов за счёт того, что между одной парой поездов вводится виртуальная сцепка и сокращённый интервал между поездами. Исходными данными для этого варианта являются следующие:

- имеется $N_{\text{уч. огр}}$ участков ограничения скорости движения;
- отправление поездов производится с интервалом $t_{\text{уст}}$ мин.;

¹ Инструкция ОАО «РЖД» от 10.11.2010 № 128. «Инструкция по расчёту наличной пропускной способности железных дорог». ОАО «Российские железные дороги». 2010. – 305 с. [Электронный ресурс]: <https://jd-doc.ru/2010/ноябр-2010/5907-instruktsiya-oao-rzhd-ot-10-11-2010-n-128>. Доступ 26.07.2023.

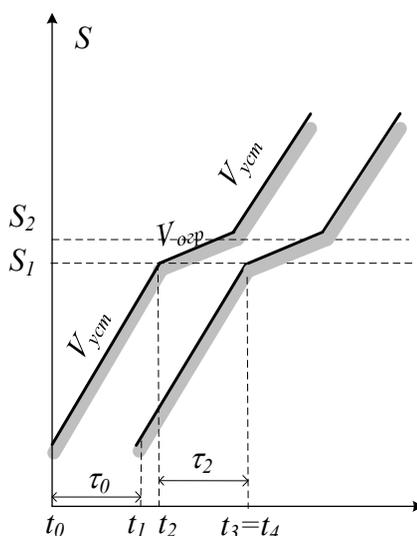


Рис. 2. Схематичное изображение расстояния между поездами при прохождении участка пути с ограничением скорости движения в случае, когда не требуется введение временной задержки [выполнено авторами].

- один раз в час выходит поезд с сокращённым интервалом $t_{\text{всц}} < t_{\text{уст}}$ мин. и поезд движется в режиме виртуальной сцепки;
- временной интервал и расстояние между поездами остаются неизменными.

При движении первого поезда на участке ограничения скорости второй поезд также замедляет скорость с $V_{\text{уст}}$ до $V_{\text{огр}}$, что приводит к увеличению временного интервала движения поездов (первого и второго) после прохождения участка ограничения скорости.

Для первого поезда временная задержка складывается из двух составляющих:

- временная задержка при прохождении участка ограничения скорости:

$$\Delta I_1 = \frac{V_{\text{уст}} - V_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot (L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}); \quad (5)$$

- дополнительная временная задержка после выхода с участка ограничения скорости:

$$\Delta I_2 = \frac{L_{\text{п}} + Z_{\text{уст}}}{V_{\text{огр}}}. \quad (6)$$

Суммарная задержка движения первого и второго поезда при прохождении одного участка ограничения скорости определяется следующим равенством:

$$\Delta I_{1,2} = \frac{V_{\text{уст}} - V_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot (L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}) + \frac{L_{\text{п}} + Z_{\text{уст}}}{V_{\text{огр}}}. \quad (7)$$

С учётом этой временной задержки (7) количество поездов в сутки (за 22 часа) будет определяться следующим соотношением:



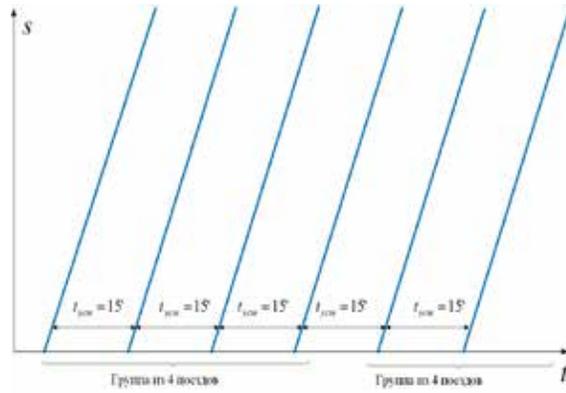


Рис. 3. Схематичное изображение движения поездов при эталонном варианте [выполнено авторами].

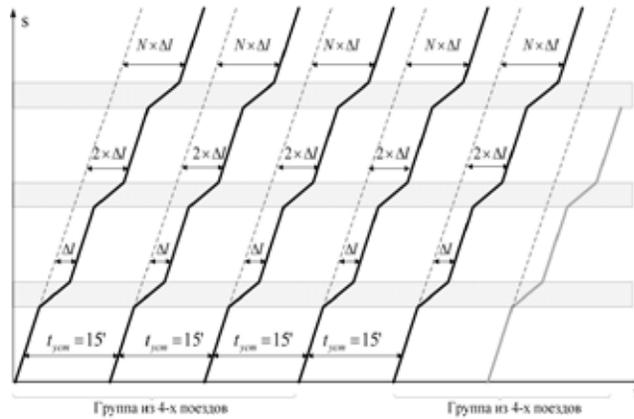


Рис. 4. Схематичное изображение движения поездов при варианте 1 [выполнено авторами].

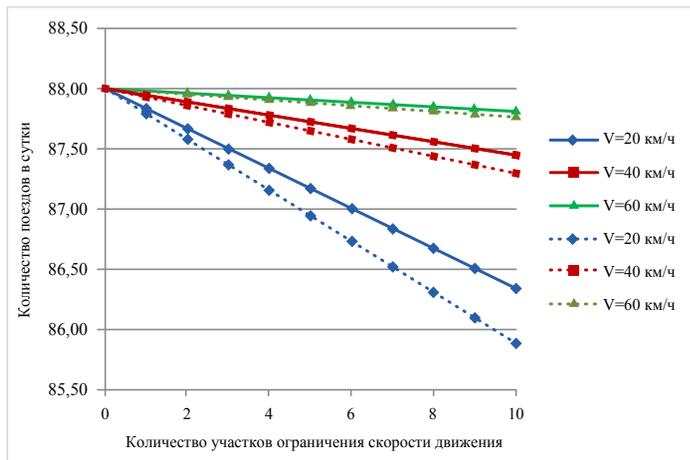


Рис. 5. Графики изменения пропускной способности для различных значений $V_{огр}$ и длин участков ограничения скорости движения [выполнено авторами].

$$n_2 = \frac{4t_{уст}}{3t_{уст} + t_{ВСЦ}} \cdot \frac{T - N_{уч.огр} \cdot \Delta I_{1,2}}{T} \quad (8)$$

Вариант 3. Этот вариант также предполагает увеличение количества отправляемых поездов за счёт того, что между одной парой поездов вводится виртуальная сцепка и сокращённый интервал между поездами, одна-

ко расстояние между поездами может меняться. Исходными данными для этого варианта являются следующие:

- имеется $N_{уч.огр}$ участков ограничения скорости движения;
- отправление поездов производится с интервалом $t_{уст}$ мин.;

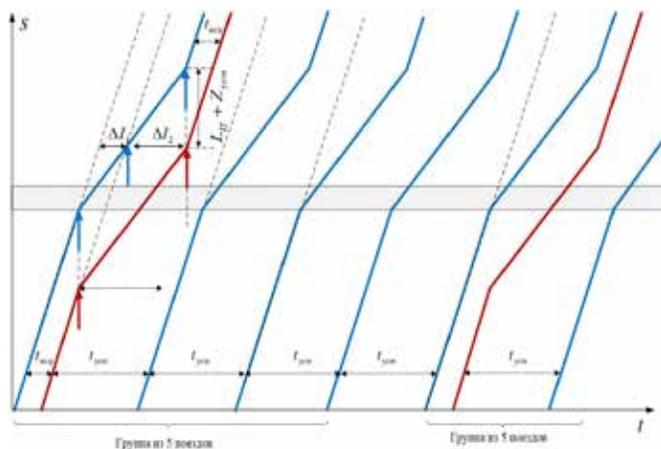


Рис. 6. Схематическое изображение движения поездов при варианте 2 [выполнено авторами].

– один раз в час выходит поезд с сокращённым интервалом $t_{\text{всц}} < t_{\text{уст}}$ мин. и поезд движется в режиме виртуальной сцепки;

– временной интервал между поездами остаётся неизменным, расстояние между поездами может меняться.

Рассматривается ситуация, когда второй поезд достигает границы участка ограничения скорости движения и расстояние между поездами не меньше трёх блок-участков. В этом случае не возникает дополнительной временной задержки ΔI_2 , поэтому количество поездов в сутки (22 часа) будет определяться с учётом только временной задержки (5) следующим образом:

$$n_3 = \frac{4t_{\text{уст}}}{3t_{\text{уст}} + t_{\text{всц}}} \cdot \frac{T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta I_1}{T} \quad (9)$$

Все прочие промежуточные варианты укладываются в диапазон между соотношениями (8) и (9).

Вариант 4. Следующий вариант описывает движение с задержкой второго поезда, движущегося в режиме виртуальной сцепки с интервалом $t_{\text{всц}}$ перед выходом на участок ограничения скорости таким образом, чтобы на выходе участка ограничения скорости временной интервал между поездами составлял бы установленную величину $t_{\text{уст}}$. Исходными данными для этого варианта являются следующие:

– имеется $N_{\text{уч.огр}}$ участков ограничения скорости движения;

– отправление поездов производится с интервалом $t_{\text{уст}}$ мин.;

– один раз в час выходит поезд с сокращённым интервалом $t_{\text{всц}} < t_{\text{уст}}$ мин. и поезд движется в режиме виртуальной сцепки;

– временной интервал между поездами на входе первого участка ограничения скорости составляет величину $t_{\text{всц}}$, а на выходе – $t_{\text{уст}}$.

Такая ситуация означает, что выход поездов с участка движения осуществляется с интервалом $t_{\text{уст}}$, что в полной мере описывается соотношениями (3) и (4), т. е.:

– временная задержка при прохождении одного участка ограничения скорости:

$$\Delta I = \frac{L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}}} - \frac{L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}}{V_{\text{уст}}} = \frac{V_{\text{уст}} - V_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot (L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}); \quad (10)$$

– общее количество поездов в сутки с учётом временных потерь, возникающих при движении первого поезда:

$$n_4 = \frac{T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta I}{I}, \quad (11)$$

где $N_{\text{уч.огр}}$ – количество участков ограничения скорости движения.

Однако для рассматриваемого варианта необходимо учитывать, что для каждой группы из пяти поездов, отправляемых на участок движения, при прохождении первого участка ограничения скорости возникает дополнительная временная задержка, определяемая разностью

$$\Delta t = t_{\text{уст}} - t_{\text{всц}}$$

Всего с интервалом $t_{\text{уст}} = I$ может быть отправлено $m_4 = T/I$ групп из пяти поездов, что приводит к накоплению временной задержки, определяемой соотношением

$$\Delta t(m_4) = m_4(t_{\text{уст}} - t_{\text{всц}}). \quad (12)$$

С учётом последнего соотношения следует, что в случае, когда время хода поезда на участке движения превосходит накопленную временную задержку (12), т. е.

$$t_{\text{ход}} > m_4(t_{\text{уст}} - t_{\text{всц}}) = T/I(t_{\text{уст}} - t_{\text{всц}}),$$



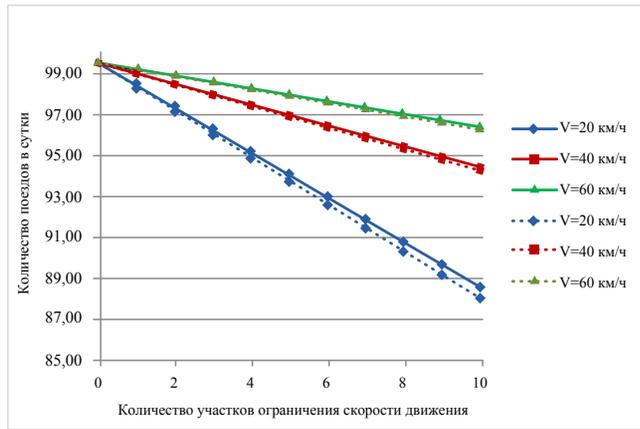


Рис. 7. Графики изменения пропускной способности для различных значений $V_{огр}$ и длин участков ограничения скорости движения [выполнено авторами].

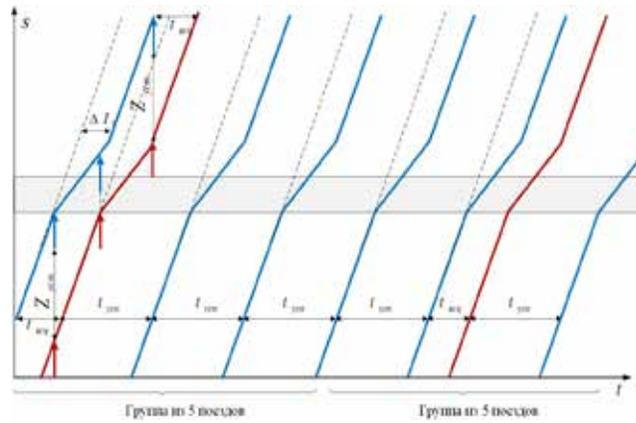


Рис. 8. Схематичное изображение движения поездов при варианте 3 [выполнено авторами].

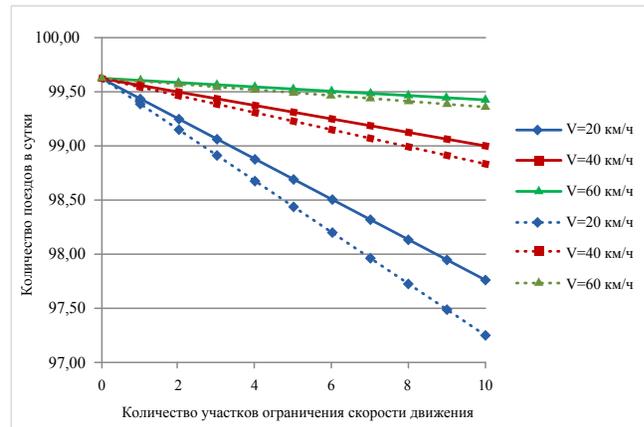


Рис. 9. Графики изменения пропускной способности для различных значений $V_{огр}$ и длин участков ограничения скорости движения [выполнено авторами].

пропускная способность участка будет определяться соотношением (11). При этом необходимое время для формирования отправляемых на участок движения поездов будет определяться зависимостью:

$$T_{всц} = \frac{3I + t_{всц}}{4I} \cdot T. \tag{13}$$

В противном случае, когда время хода поезда на участке движения меньше накопленной временной задержки (12), т. е.

$$t_{хода} < \frac{T}{4I}(t_{уст} - t_{всц}),$$

то возникает задержка отправки очередной группы из пяти поездов на участок движения,

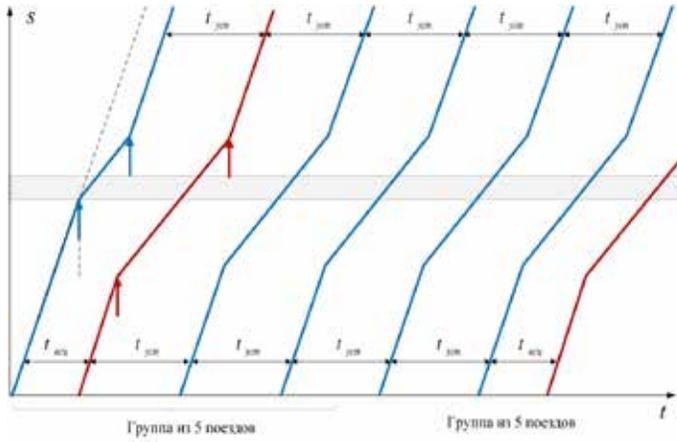


Рис. 10. Схематическое изображение движения поездов при варианте 4 [выполнено авторами].

что снижает эффект от применения виртуальной сцепки. Однако пропускная способность участка при этом будет также определяться соотношением (11), а время $T_{\text{всц}}$ будет приближаться к T .

Вариант 5. Рассматриваемый вариант является подобием предыдущего варианта и отличается от него тем, что описывает движение с задержкой второго поезда, движущегося в режиме виртуальной сцепки с интервалом $t_{\text{всц}}$, перед выходом на участок ограничения скорости таким образом, чтобы на выходе участка ограничения скорости временной интервал между поездами составлял бы величину $t'_{\text{уст}} < t_{\text{уст}}$. Исходными данными для этого варианта являются следующие:

- имеется $N_{\text{уч.огр}}$ участков ограничения скорости движения;
 - отправление поездов производится с интервалом $t_{\text{уст.мин.}}$;
 - один раз в час выходит поезд с сокращенным интервалом $t_{\text{всц}} < t_{\text{уст.мин.}}$ и поезд движется в режиме виртуальной сцепки;
 - временной интервал между поездами на входе первого участка ограничения скорости составляет величину $t_{\text{всц}}$, а на выходе — $t'_{\text{уст}} < t_{\text{уст}}$.
- Такая ситуация означает, что выход поездов с участка движения осуществляется с интервалом $t'_{\text{уст}} < t_{\text{уст}}$, что описывается соотношениями (3) и (4), т. е.:

– временная задержка при прохождении одного участка ограничения скорости составляет величину:

$$\Delta t = \frac{L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}}} - \frac{L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}}{V_{\text{уст}}} = \frac{V_{\text{уст}} - V_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot (L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}); \quad (14)$$

– общее количество поездов в сутки с учётом временных потерь, возникающих при движении первого поезда:

$$n_s = \frac{T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta t}{I}, \quad (15)$$

где $N_{\text{уч.огр}}$ — количество участков ограничения скорости движения.

Как и в предыдущем варианте, также необходимо учитывать, что для каждой группы из четырёх поездов, отправляемых на участок движения, при прохождении первого участка ограничения скорости возникает дополнительная временная задержка, определяемая разностью

$$\Delta t' = t'_{\text{уст}} - t_{\text{всц}} < t_{\text{уст}} - t_{\text{всц}}$$

Всего с интервалами $t_{\text{уст}} = I$ и $t'_{\text{уст}} < t_{\text{уст}}$ может быть отправлено

$$m_5 = \frac{4(T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta t')}{3I + t'_{\text{уст}}}$$

групп из пяти поездов, что приводит к накоплению временной задержки, определяемой соотношением

$$\Delta t(m_5) = m_5(t'_{\text{уст}} - t_{\text{всц}}). \quad (16)$$

С учётом последнего соотношения следует, что в случае, когда время хода поезда на участке движения превосходит накопленную временную задержку (12), т. е.

$$t_{\text{хода}} > m_5(t'_{\text{уст}} - t_{\text{всц}}) = \frac{4(T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta t')}{3I + t'_{\text{уст}}}(t'_{\text{уст}} - t_{\text{всц}}),$$

пропускная способность участка будет определяться соотношением (15). При этом необходимое время для формирования отправляемых на участок движения поездов будет определяться зависимостью:

$$T'_{\text{всц}} = \frac{3I + t'_{\text{уст}}}{4I} \cdot T. \quad (17)$$

В противном случае, когда время хода поезда на участке движения меньше накопленной временной задержки (16), т. е.



Таблица 1

Вариант	$V_{\text{огр}} = 40 \text{ км/ч}$	$V_{\text{огр}} = 60 \text{ км/ч}$
<p>Вариант 1. Движение без ВСЦ.</p> <p>Расчётные зависимости:</p> $\Delta I = \frac{V_{\text{уст}} - V_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot (L_{\text{п}} + S_{\text{огр}});$ $n_1 = \frac{T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta I}{I}.$	$n_1 = 88$	$n_1 = 88$
<p>Вариант 2. Один раз в час выходит поезд с интервалом $t_{\text{ВСЦ}}$ (расстояние между поездами не меняется).</p> <p>Время задержки первого поезда t_3. (Первый поезд продолжает движение со скоростью $V_{\text{огр}}$ в течении t_3 после выхода с участка).</p> <p>Расчётные зависимости:</p> $\Delta I_{1,2} = \frac{V_{\text{уст}} - V_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot (L_{\text{п}} + S_{\text{огр}}) + \frac{L_{\text{п}} + Z_{\text{уст}}}{V_{\text{огр}}};$ $n_2 = \frac{4t_{\text{уст}}}{3t_{\text{уст}} + t_{\text{ВСЦ}}} \cdot \frac{T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta I_{1,2}}{T}.$	$n_2 = 97$ $t_3 = 6 \text{ мин}$	$n_2 = 98$ $t_3 = 4 \text{ мин}$
<p>Вариант 3. Один раз в час выходит поезд с интервалом $t_{\text{ВСЦ}}$ (расстояние между поездами может меняться).</p> <p>Время сокращения дистанции до трех блок-участков (3 км) $t_{\text{д}}$.</p> <p>Расчётные зависимости:</p> $\Delta I_1 = \frac{V_{\text{уст}} - V_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot (L_{\text{п}} + S_{\text{огр}});$ $n_3 = \frac{4t_{\text{уст}}}{3t_{\text{уст}} + t_{\text{ВСЦ}}} \cdot \frac{T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta I_1}{T}.$	$n_3 = 99$ $t_{\text{д}} = 10 \text{ мин}$	$n_3 = 100$ $t_{\text{д}} = 20 \text{ мин}$
<p>Вариант 4. Один раз в час выходит поезд с интервалом $t_{\text{ВСЦ}}$.</p> <p>Интервалы между поездами на выходе с участка движения равны $t_{\text{уст}}$.</p> <p>Расчётные зависимости:</p> $\Delta I = \frac{V_{\text{уст}} - V_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot (L_{\text{п}} + S_{\text{огр}});$ $n_4 = \frac{T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta I}{I}.$	$n_4 = 88$	$n_4 = 88$
<p>Вариант 5. Один раз в час выходит поезд с интервалом $t_{\text{ВСЦ}}$.</p> <p>Интервалы между поездами на выходе с участка движения равны $t'_{\text{уст}}$ для второго поезда в группе и $t_{\text{уст}}$ для третьего и четвертого поездов в группе.</p> <p>Расчётные зависимости:</p> $\Delta I = \frac{V_{\text{уст}} - V_{\text{огр}}}{V_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot (L_{\text{п}} + S_{\text{огр}});$ $n_5 = \frac{4t_{\text{уст}}}{t'_{\text{уст}} + 3t_{\text{уст}}} \cdot \frac{T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta I}{I}.$	$n_5 = 91$	$n_5 = 91$

$$t_{\text{хода}} < \frac{4(T - N_{\text{уч.огр}} \cdot \Delta I')}{3I + t'_{\text{уст}}} (t'_{\text{уст}} - t_{\text{ВСЦ}}),$$

возникает задержка отправки очередной группы из четырёх поездов на участок движения, что приводит к снижению эффекта от применения виртуальной сцепки. Однако пропуск-

ная способность участка при этом будет также определяться соотношением (15), а время $T'_{\text{ВСЦ}}$ будет приближаться к T .

Например, для конкретных данных:

$$L_{\text{п}} = 1000 \text{ м}; S_{\text{огр}} = 100 \text{ м}; N_{\text{уч.огр}} = 4 \text{ шт.};$$

$$V_{\text{уст}} = 80 \text{ км/ч}; V_{\text{огр}} = 60 \text{ и } 40 \text{ км/ч}; t_{\text{уст}} = 15 \text{ мин.};$$

$t'_{\text{уст}} = 13$ мин.; $t_{\text{ВСЦ}} = 8$ мин. будут получены оценки, представленные в табл. 1.

Сравнение полученных оценок позволяет установить следующее:

– для вариантов 1, 4 применения виртуальной сцепки пропускная способность не уменьшается;

– для вариантов 2, 3 применения виртуальной сцепки пропускная способность возрастает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно сделать предварительный вывод, подтверждаемый расчётами: виртуальная сцепка поездов, как минимум, не уменьшает пропускную способность участков с ограничением скорости движения, а при некоторых вариантах её применения и действующих ограничениях обеспечивает повышение пропускной способности. Это позволяет уже сейчас говорить о целесообразности практического применения виртуальной сцепки на отдельных участках железных дорог, но для обоснования практических методик определения вариантов её применения для конкретных участков железной дороги требует проведения более детального исследования, включая компьютерное моделирование работы ВСЦ с учётом более широкого набора параметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Воронин В. А., Гургенидзе И. Р., Дежков М. А. [и др.]. Комплексная технология интервального регулирования движения поездов. – М.: АО «Т8 Издательские технологии», 2023. – 216 с. ISBN 978-5-521-23792-0.
2. Дежков М. А., Кисельгоф Г. К. Технология «виртуальной сцепки» для интервального регулирования движения поездов // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 11. – С. 28–30. DOI 10.34649/AT.2021.11.11.007.
3. Власьевский С. В., Малышева О. А., Шабалин Н. Г., Семченко В. В. Оценка энергетической эффективности электровозов ЗЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» // Вестник ВНИИЖТ. – 2020. – Т. 79. – № 1. – С. 17–25. EDN: TCHPBA.

4. Оленцевич В. А., Упырь Р. Ю., Антипина А. А. Эффективность внедрения интервального регулирования движения поездов по системе «виртуальная сцепка» на участке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 2 (66). – С. 182–189. DOI 10.26731/1813–9108.2020.2(66).182–189.

5. Розенберг Е. Н., Озеров А. В., Панферов И. А. Комплексный подход к решению задачи повышения пропускной способности // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 8. – С. 2–6. DOI 10.34649/AT.2022.8.8.001.

6. Розенберг Е. Н., Шухина Е. Е., Озеров А. В., Малинов В. М. Современные системы управления движением поездов: Отечественный и зарубежный опыт. – М.: ООО «Издательские решения», 2020. – 210 с. ISBN 978-5-0051-0924-8.

7. Озеров А. В. Европейская система интервального регулирования // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 6. – С. 14–15. DOI 10.34649/AT.2019.6.6.004.

8. Озеров А. В., Биленко Г. М., Окулова М. Л. Современные системы интервального регулирования движения поездов // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: Сб. трудов научно-практ. конференции с международным участием, Москва, 20–21 октября 2021 года. – М.: РУТ, 2022. – С. 323–326. EDN: MLHMVQ.

9. Озеров А. В. Эволюция европейской системы управления движением поездов // Железные дороги мира. – 2018. – № 3. – С. 64–73. EDN: YPSWJW.

10. Попов П. А., Озеров А. В. Интервальное регулирование на основе цифрового радиоканала // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 10. – С. 19–22. EDN: WMQLXP.

11. Quaglietta, E., Goverde, R. M. P. A comparative analysis of Virtual Coupling Railway operations. In Proceedings of the 99th Transportation Research Board Annual Meeting. Transportation Research Board (TRB). 2020. [Электронный ресурс]: <https://research.tudelft.nl/en/publications/a-comparative-analysis-of-virtual-coupling-railway-operations>.

12. Quaglietta E. Analysis of Platooning Train Operations under V2V Communication-Based Signaling: Fundamental Modelling and Capacity Impacts of Virtual Coupling. Computer Science, 2019. [Электронный ресурс]: https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/85752612/E.Quaglietta_Analysis_of_platooning_train_operations_Final_.pdf. Доступ 23.06.2023.

13. Flammini, F., Marrone, S., Nardone, R., Petrillo, A., Santini, S., Vittorini, V. Towards Railway Virtual Coupling. IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference. 2018. DOI:10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607523.

14. Бушуев С. В., Гундырев К. В., Голочалов Н. С. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки // Системы управления на транспорте. – 2021. – № 1. – С. 7–20. EDN: MWGMZR. ●

Информация об авторах:

Розенберг Ефим Наумович – доктор технических наук, профессор, первый заместитель Генерального директора АО «НИИАС», Москва, Россия, info@vniias.ru.

Озеров Алексей Валерьевич – начальник Международного управления АО «НИИАС», Москва, Россия, a.ozеров@vniias.ru.
Кузнецов Валерий Иванович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Отдела научно-исследовательской работы ЦРТП НТК ИСКУ АО «НИИАС», Москва, Россия, v.kuznetsov@vniias.ru.

Тихонов Сергей Сергеевич – главный специалист Отдела научно-исследовательской работы ЦРТП НТК ИСКУ АО «НИИАС», Москва, Россия, s.tihonov@vniias.ru.

Статья поступила в редакцию 23.08.2023, одобрена после рецензирования 26.09.2023, принята к публикации 02.10.2023.

