

УДК 656.222

## Моделирование движения поездов на основании анализа статистических данных

Д. В. Язев<sup>1</sup>, В. В. Костенко<sup>1</sup>, А. Н. Иванков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup>ООО «ПСК ТехПроект», Россия, 107140, Москва, Красносельский 3-й пер., 21, стр. 1

**Для цитирования:** Язев Д. В., Костенко В. В., Иванков А. Н. Моделирование движения поездов на основании анализа статистических данных // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 370–380. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-370-380

### Аннотация

В статье рассматриваются особенности моделирования движения поездов с уточнением результатов тяговых расчетов. **Цель:** модификация уравнения движения поезда с учетом случайных факторов на основании обработанных статистических данных для использования в динамических моделях. **Методы:** математическое моделирование, теория вероятностей, методы Эйлера, Рунге — Кутты. Проверяются статистические гипотезы о принадлежности данных регистрации реальных поездок и данных, полученных моделированием, к одной генеральной совокупности. **Результаты:** в ходе анализа статистических данных, полученных с кассет регистрации и скоростемерных лент, предлагается уточнить существующее уравнение движения корректирующими коэффициентами, полученными эмпирическим путем. Выдвигается гипотеза о принадлежности статистических и расчетных данных к одной генеральной совокупности. **Практическая значимость:** в результате подтверждения гипотезы модифицированное уравнение движения возможно использовать при моделировании движения потока поездов с различными динамическими характеристиками, в том числе при приеме и отправлении на станциях, а также определить фактические значения станционных и межпоездных интервалов.

**Ключевые слова:** уравнение движения поезда, тяговые расчеты, динамика движения поезда, математическое моделирование, прибытие на станцию

### Введение

При планировании поездной работы, составлении графика движения поездов, определении лимитирующих элементов пропускной способности и решении многих других научно-технических задач не всегда достаточно упрощенного представления движения грузового поезда линией  $s = f(t)$  на основании средних значений скорости движения по перегону и на участках разгона и торможения. При необходимости детализации описания процесса движения обычно применяют тяговые расчеты, а также специализированное программное

обеспечение по их автоматизации, например, «ИСКРА-ПТР», «ЭРА-ТЭП», МСУ, КОРТЭС и т. п. [1–4].

Но необходимо понимать, что фактическое движение поездов заметно отличается от теоретического. Тяговые расчеты дают идеальный случай, по которому поезд может проследовать с учетом всех параметров и ограничений, предлагаемых методиками тяговых и тормозных расчетов. При этом не учитывается влияние на динамику движения поезда многочисленных внешних, зачастую случайных факторов, таких как:

- опытность машиниста;
- техническое состояние локомотива и вагонов;
- распределение вагонов разной массы по составу;
- погодные условия;
- расположение разделительных стрелок на маршрутах и пути приема и отправления поезда;
- оперативные задачи, поставленные перед машинистом поездным диспетчером и дежурным по станции и т. п.

В ряде случаев учет этих факторов не важен, так как в графиках движения на основании опытных поездок заложен запас времени. Но в последние годы существует тенденция повышать пропускную способность участков за счет использования эксплуатационных резервов. Такие возможности появились в связи с новыми системами автоматической блокировки, которые позволяют снизить межпоездные интервалы на перегонах в грузовом движении до 5–6 минут [5]. Таким образом, расчетная пропускная способность, определенная в соответствии с методикой [6], повышается, но это повышение не подтверждается практикой. Даже минимальные задержки одного из поездов, следующих в потоке на межпоездном интервале, вызывают цепную реакцию замедления всего потока. Наиболее сложный случай представляют собой стыки перегонов и станций. Наблюдаются многочисленные случаи, когда пропускная способность станций не позволяет обеспечить интервал попутного прибытия или отправления, соответствующий межпоездному интервалу автоблокировки на прилегающих перегонах [7–9].

В связи с этим при построении моделей движения поездов в потоке, соответствующих реальной ситуации, необходимо использовать реальные времена хода, а также фактические

зависимости вида  $v = f(s)$ , с разбивкой на элементы по 5–20 м.

### Цели и задачи

Целью данной работы является уточнение уравнения движения поезда для моделирования его динамики с учетом случайных факторов на основании статистических данных. Для ее достижения решены следующие задачи: сбор и статистическая обработка данных кассет регистрации и скоростемерных лент, исследование составляющих уравнения движения поезда, подбор уточняющих коэффициентов, проверка гипотезы о принадлежности статистических и теоретических данных к одной генеральной совокупности. В работе применены методы математического моделирования движения поезда, проверки статистических гипотез.

### Анализ статистических данных

Данные о динамике движения грузовых поездов собраны по различным перегонам и станциям Октябрьской железной дороги.

Результаты анализа статистических данных показали, что для дальнейшей обработки данных следует разделить грузовые поезда по весовым категориям на легкие (порожние), весом до 2500 т, средние (среднегруженные) — от 2500 до 4500 т, тяжелые (груженные) — 4500 т и выше. Данная декомпозиция позволяет подобрать параметры нормального распределения скоростей движения поездов в зависимости от скоростных ограничений на участках с незначительными уклонами. Данные результаты проверены на соответствие закону распределения по критерию Лиллиефорса и критерию согласия Пирсона. Кривая плотности вероятности для тяжелых поездов при ограничении 80 км/ч представлена на рис. 1. Также получены зависимости для параметров нормального распределения, представленные на рис. 2 и 3.



Рис. 1. Сравнение фактических данных с теоретическим законом распределения для тяжелых поездов

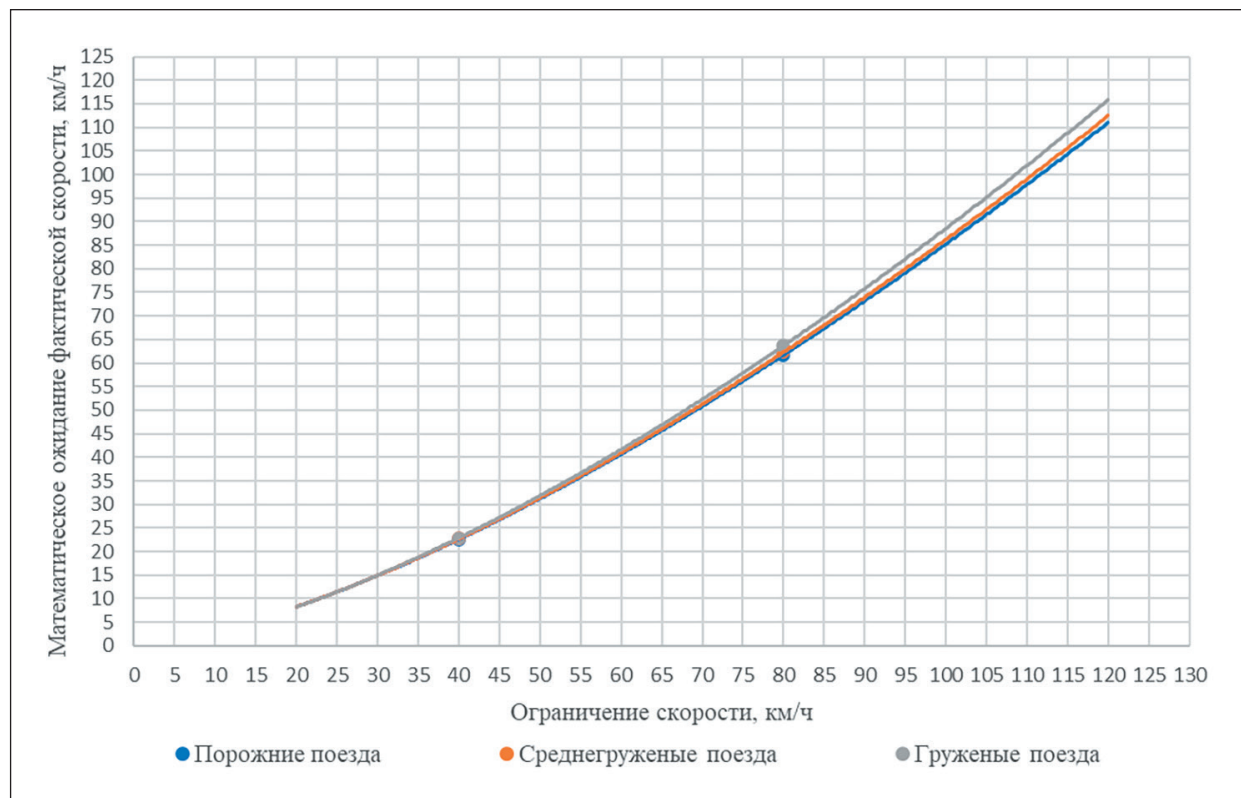
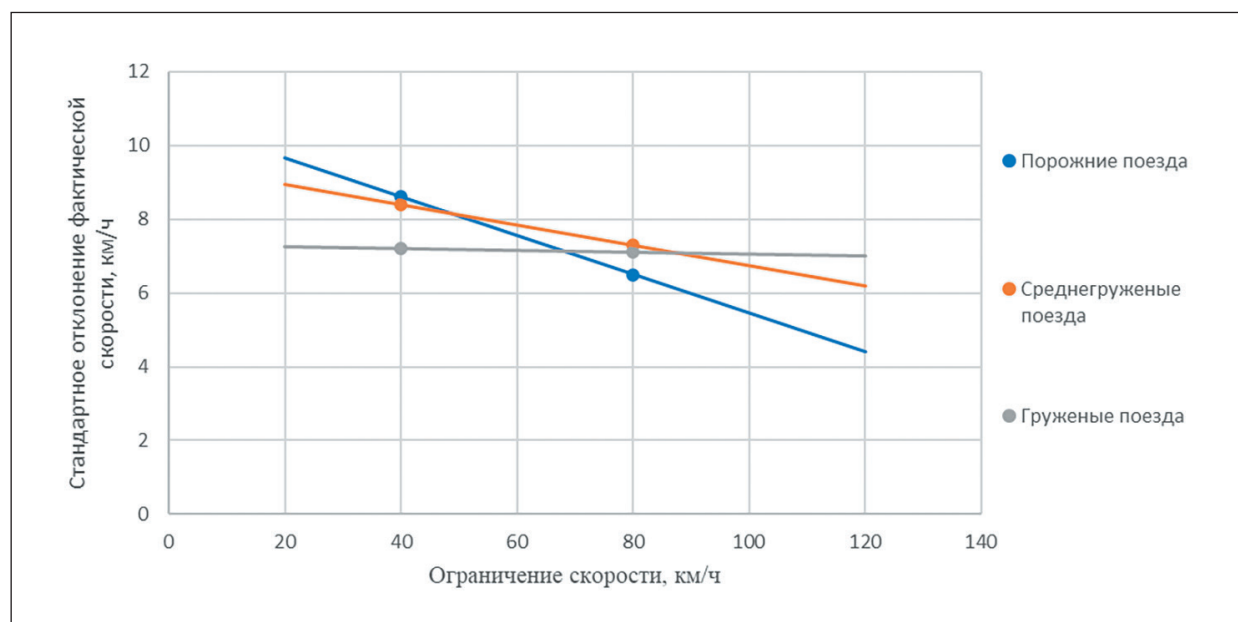


Рис. 2. Зависимость математического ожидания фактической скорости от ограничения и весовой категории грузовых поездов



**Рис. 3.** Зависимость стандартного отклонения фактической скорости от ограничения и весовой категории грузовых поездов

**Корректировка уравнения движения поезда**

Несмотря на полученные параметры нормального закона распределения, для целого ряда случаев получить отрезки теоретической кривой движения поезда, отражающие реальную динамику, не получится. Прежде всего это касается случаев разгона и торможения и значительных уклонов. Как было сказано ранее, для учета динамики и построения кривых вида  $v = f(s)$  возможно применение тяговых расчетов и решение уравнения движения поезда, имеющего следующий вид [10]:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta(f_k - w_k - b_t), \tag{1}$$

где  $\zeta$  — ускорение поезда в км/ч<sup>2</sup> при действии удельной ускоряющей силы 1 Н/кН,  $\zeta = 120 \text{ км/ч}^2 / (\text{Н/кН})$ ;  
 $f_k$  — удельная сила тяги, Н/кН;  
 $w_k$  — удельная сила сопротивления движению, включающая в себя основное сопро-

тивление от локомотива ( $w'_{o(x)}$ ) и вагонов ( $w''_o$ ), а также дополнительные сопротивления от уклона ( $w_i$ ) и кривых ( $w_r$ ), Н/кН:

$$w = \frac{w'_{o(x)}P + w''_oQ_{бр}}{P + Q_{бр}} + w_i + w_r; \tag{2}$$

$b_t$  — удельная тормозная сила, Н/кН;  
 $P$  — вес локомотива, т;  
 $Q_{бр}$  — вес состава, т.

Однако такой расчет даст идеальные значения, не соответствующие фактическому движению поезда. Следовательно, целесообразно на основе статистических данных провести корректировку рассматриваемого уравнения дополнительными коэффициентами.

В первую очередь необходимо учесть поведение машиниста. Основное воздействие, оказываемое им на движение поезда, осуществляется посредством регулирования силы тяги и применения тормозов поезда. Если считать, что торможение — это по своей сути процесс вынужденного снижения скорости в силу тех

или иных ограничений, то изменение силы тяги связано с регулировочными мероприятиями, направленными на удержание средней скорости, соответствующей графиковому времени хода и изменению скорости при преодолении различных элементов профиля пути. Таким образом, для силы тяги возможно применение коэффициента:

$$k = k_{\text{cp}} + k_{\text{ск}} + k_{\text{укл}}, \quad (3)$$

где  $k_{\text{cp}}$  — коэффициент, учитывающий движение поезда со средней скоростью, соответствующей графиковому времени хода, при заданном ограничении скорости, серии тягового подвижного состава и весовой категории поезда. Данный коэффициент определен эмпирическим методом для разных типов локомотивов и, например, для локомотива 2ЭС4к составляет:

$$k_{\text{cp}} = (0,0017v_{\text{огр}} - 0,0003) \text{ для Л-категории;}$$

$$k_{\text{cp}} = (0,0018v_{\text{огр}} + 0,0284) \text{ для С-категории;}$$

$$k_{\text{cp}} = (0,002v_{\text{огр}} + 0,0555) \text{ для Т-категории;}$$

где  $v_{\text{огр}}$  — ограничение скорости, км/ч,

$k_{\text{ск}}$  — коэффициент, учитывающий плавное переключение позиций контроллера машиниста в зависимости от разности текущей скорости движения и ограничения:

$$k_{\text{ск}} = \begin{cases} k_{\text{cp}} \cdot \frac{v_{\text{cp}} - v}{v_{\text{огр}} - v_{\text{cp}}}, & \text{при } v_{\text{cp}} < v \leq v_{\text{огр}} \\ 0, & \text{при } v_{\text{cp}} = v \text{ или} \\ & \text{при движении на КЖ;} \\ (1 - k_{\text{cp}}) \cdot \frac{v_{\text{cp}} - v}{v_{\text{cp}}}, & \text{при } v_{\text{cp}} > v \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

где  $v$  — текущая скорость поезда, км/ч;

$v_{\text{cp}}$  — средняя скорость поезда, км/ч. Определяется по эмпирическим зависимостям для поездов различных весовых категорий в зависимости от ограничения скорости:

$$v_{\text{cp}} = 0,108v_{\text{огр}}^{1,449} \text{ для Л-категории;}$$

$$v_{\text{cp}} = 0,105v_{\text{огр}}^{1,457} \text{ для С-категории;}$$

$v_{\text{cp}} = 0,099v_{\text{огр}}^{1,476}$  для Т-категории;

$k_{\text{укл}}$  — коэффициент, учитывающий изменение силы тяги в зависимости от преодолеваемого уклона:

$$k_{\text{укл}} = \begin{cases} 1 - k_{\text{cp}} - k_{\text{ск}}, & \text{при } w_i \geq i_{\text{кр}} \\ (1 - k_{\text{cp}} - k_{\text{ск}}) \cdot \frac{w_i}{i_{\text{кр}}}, & \text{при } i_{\text{кр}} > w_i > 0 \\ 0, & \text{при } w_i = 0 \\ (k_{\text{cp}} - k_{\text{ск}}) \cdot \frac{w_i}{w_0}, & \text{при } 0 > w_i > -w_0 \\ -(k_{\text{cp}} - k_{\text{ск}}), & \text{при } w_i \leq -w_0 \end{cases} ; \quad (5)$$

где  $w_0$  — основное удельное сопротивление движению поезда, Н/кН;

$w_i$  — дополнительное удельное сопротивление движению подвижного состава от приведенного уклона, Н/кН;

$i_{\text{кр}}$  — критический уклон, преодолеваемый поездом на заданной скорости, %.

Помимо этого, в уравнении движения должны учитываться случайные факторы, оказывающие влияние на движение поезда. Для учета случайных отклонений от математического ожидания каждое слагаемое уравнения (1) умножается на соответствующий коэффициент, значение которого задается случайно для каждого поезда.

В результате итоговое уравнение движения поезда примет вид:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta (\alpha k f_k - \beta w_k - \gamma b_T), \quad (6)$$

где  $\alpha$  — доля использования максимально реализуемой силы тяги с учетом ограничения по сцеплению;

$\delta$  — интервал изменения действующей силы сопротивления, зависящий от различных случайных внешних факторов, не учитываемых расчетами;

$\gamma$  — доля использования тормозной силы от максимально реализуемой;

$k$  — коэффициент использования силы тяги, характеризующий поведение машиниста и зависящий от изменяющихся условий движения.

Для решения данного дифференциального уравнения можно воспользоваться методами Эйлера или Рунге — Кутты [11]. При выполнении моделирования движения поезда используется численное интегрирование с шагом 5 м на рассматриваемом участке пути.

Стоит отметить, что при построении кривой торможения (кроме случаев остановки поезда) конечная скорость в модели должна быть стохастической в силу невозможности точно регулировать тормозную силу при различающихся характеристиках подвижного состава, элементов инфраструктуры и поездной обстановки.

### Применимость полученного уравнения

Для проверки применимости полученного уравнения проведено сравнение скоростей,

полученных теоретически, с эмпирическими данными на нескольких рассматриваемых участках в одних и тех же точках. Выдвинута гипотеза о принадлежности двух выборок одной генеральной совокупности. Проверка поставленной гипотезы проведена с помощью  $U$ -критерия Манна — Уитни, в результате которой значение критерия составило  $U = \pm 0,67$ , что на уровне значимости  $p = 0,05$  не превышает критического значения 1,96. Таким образом, можно утверждать, что обе выборки принадлежат одной генеральной совокупности, а следовательно, полученное скорректированное уравнение движения поезда может быть применимо. Графически сравнение результатов моделирования со статистическими данными представлено на рис. 4–6.

### Выводы

Как итог, полученное модифицированное уравнение движения возможно использовать при моделировании движения потоков

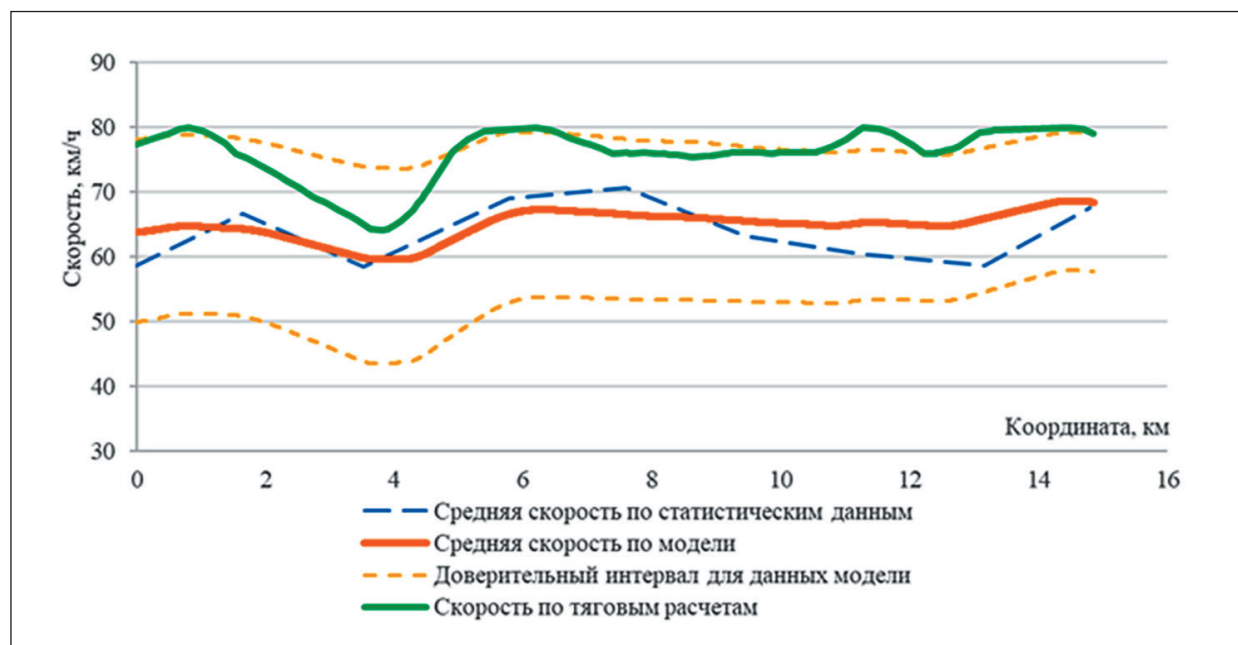


Рис. 4. Сравнение динамики движения поезда при следовании по перегону в груженом направлении

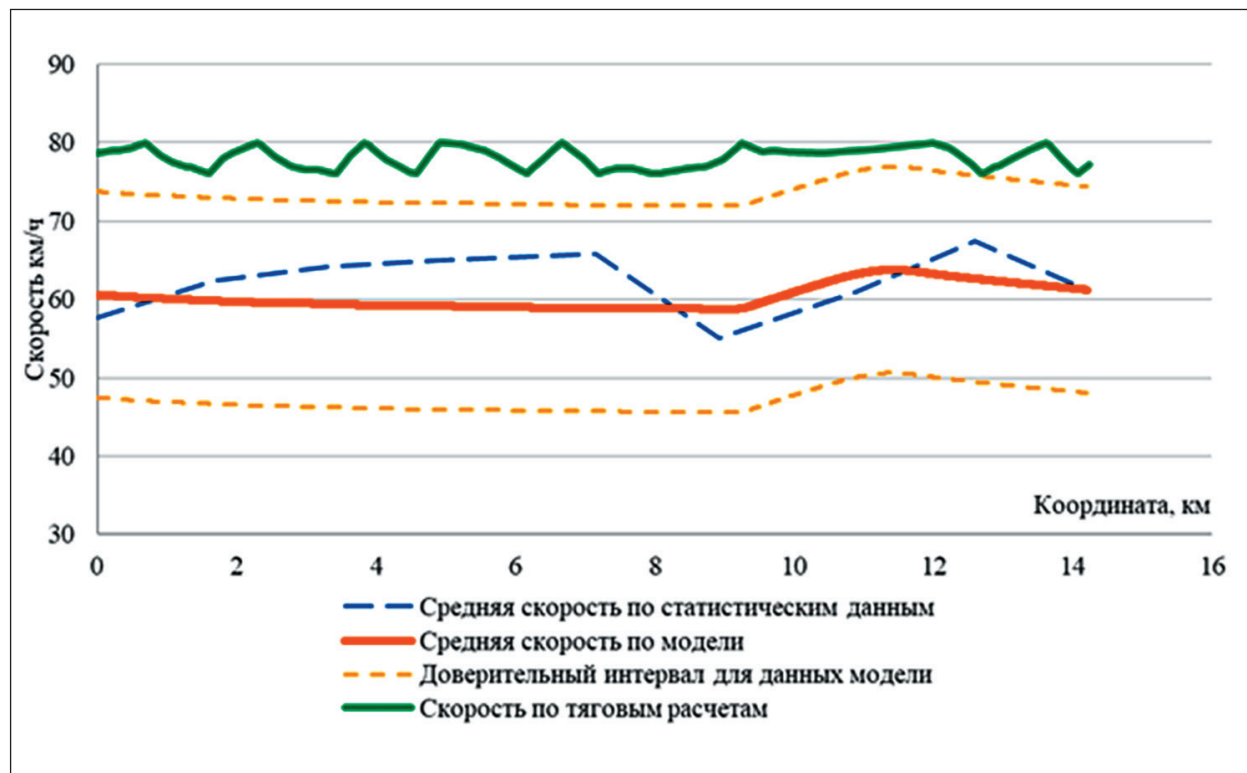


Рис. 5. Сравнение динамики движения поезда при следовании по перегону в порожнем направлении

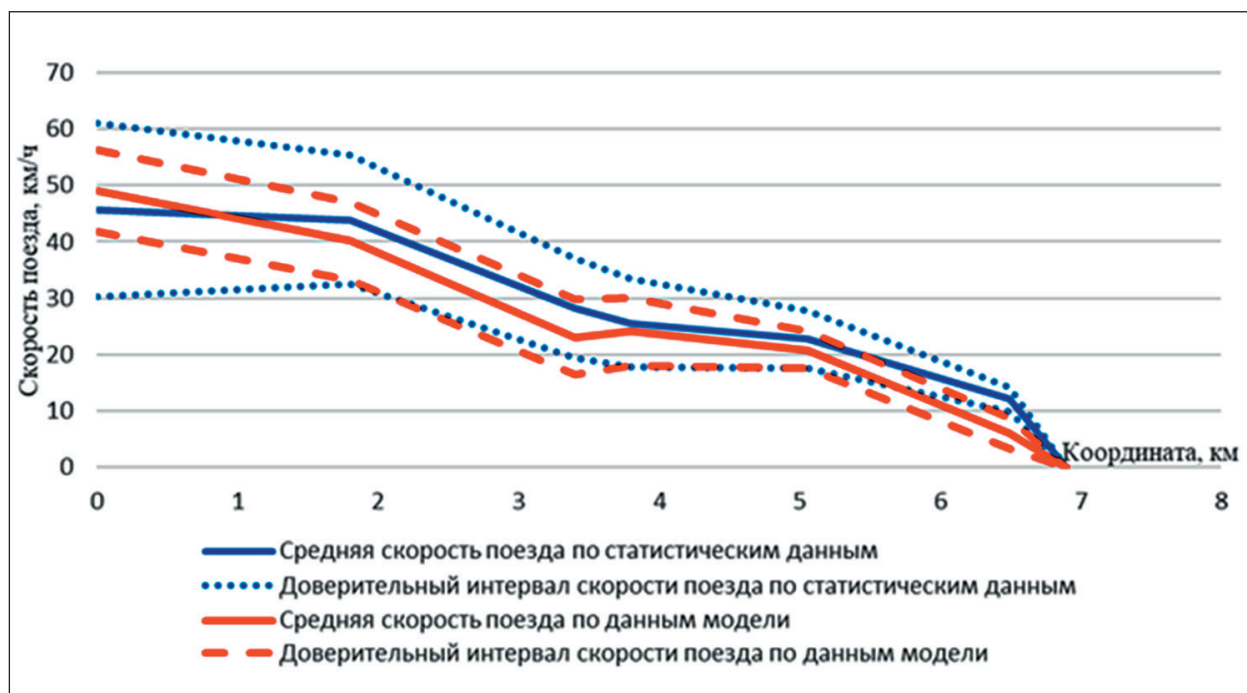


Рис. 6. Сравнение динамики движения поезда при прибытии на станцию

поездов с различными динамическими характеристиками, при различных системах СЦБ, на стыках перегонов и станций. Также будет возможным отслеживание местоположения головы и хвоста поезда, что предоставит данные о времени переключения сигналов локомотивного и путевых светофоров, занятия и освобождения изолированных стрелочных секций [12]. Данное решение позволит рассматривать движение нескольких поездов с различными динамическими характеристиками при их следовании в пакете, взаимовлияние друг на друга, а также определять фактические значения станционных и межпоездных интервалов.

#### Список источников

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы: распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р.
2. Литвинова А.В., Могила В.П. Меры повышения ходовой скорости движения грузовых поездов на железнодорожном полигоне Ружино — Владивосток // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2013. Т. 2. С. 71–76.
3. Мельк В.О., Вильгельм А.С., Бондаревский Д. И. Повышение точности тяговых расчетов с применением программы «Комплекс расчетов тягового электроснабжения (КОРТАЭС)» // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 3 ч. (Омск, 10–11 декабря 2015 года) / отв. ред. И. И. Галиев. Ч. 3. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2015. С. 180–190.
4. Моделирование работы участка Восточного полигона с использованием программы МСУ в условиях нарушения «нормального» режима ведения поездов / Ж. Янев [и др.] // Наука и техника транспорта. 2024. № 2. С. 13–18.
5. Оптимизация эксплуатационной работы в условиях внедрения современных систем интервального регулирования движения поездов / И. Г. Ковалевский [и др.] // Научные исследования и инновации: сборник статей XI Международной научно-практической конференции (Саратов, 2 сентября 2021 года). Саратов: ИП Емельянов Н.В., 2021. С. 57–64.
6. Об утверждении Методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования: приказ Минтранса РФ от 18.07.2018 № 266.
7. Левин Д.Ю., Павлов В.Л. Расчет и использование пропускной способности железных дорог: монография. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2011. 364 с.
8. Язев Д.В., Костенко В.В. Исследование движения потока грузовых поездов на подходах к станциям стыкования родов тока // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т. (Санкт-Петербург, 14–21 апреля 2025 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2025. С. 154–159.
9. Костенко В.В., Язев Д.В. Моделирование процессов приема грузового поездопотока на техническую станцию при различных исходных параметрах // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах: сборник трудов: в 2 ч. (Санкт-Петербург, 11–13 октября 2023 года). СПб.: ПГУПС, 2023. С. 247–252.
10. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов: учебник для студентов техникумов и колледжей ж/д транспорта. М.: УМК МПС России, 2000. 592 с.
11. Абляимов О.С. Уравнение движения поезда и некоторые методы его решения // Universum: технические науки. 2020. № 9 (78). С. 72–75.

12. Язев Д. В., Костенко В. В. Математическая модель посекционного занятия горловины железнодорожной станции с учетом динамики прибывающего поезда // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 15–22 апреля 2024 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. С. 361–366.

Дата поступления: 18.04.2026

Решение о публикации: 15.05.206

#### Контактная информация:

ЯЗЕВ Денис Викторович — аспирант;

denchik\_yazik167@mail.ru

КОСТЕНКО Владимир Васильевич — кандидат

техн. наук, доцент; docentkostenko@yandex.ru

ИВАНКОВ Алексей Николаевич – кандидат техн.

наук, доцент; aivankov@yandex.ru

## Simulation of Train Movement Based on Statistical Data Processing

D. V. Yazev<sup>1</sup>, V. V. Kostenko<sup>1</sup>, A. N. Ivankov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> “PSK TechProekt” LTD, bldg. 1, 21 Krasnoselsky 3rd aley., Moscow, 107140, Russia

For citation: *Yazev D. V., Kostenko V. V., Ivankov A. N.* Simulation of Train Movement Based on Statistical Data Processing // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 370–380. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-370-380 (In Russian)

### Abstract

The article discusses the features of modeling of train movement with clarification of the results of traction calculations. **Purpose:** modification of the train movement equation taking into account random factors based on processed statistical data for use in dynamic models. **Methods:** mathematical modeling, probability theory, Euler, Runge — Kutta methods. Statistical hypotheses are tested about the belonging of real trip registration data and data obtained by modeling to one general population. **Results:** during the analysis of statistical data obtained from recording cassettes and high-speed tapes, it is proposed to clarify the existing equation of motion with correction coefficients obtained empirically. A hypothesis is put forward that statistical and calculated data belong to one total population. **Practical significance:** as a result of confirming the hypothesis, the modified equation of motion can be used when modeling the movement of the flow of trains with various dynamic characteristics, including when arriving and departing at stations, as well as determine the actual values of station and inter-train intervals.

**Keywords:** equation of train movement, traction calculations, dynamics of train movement, mathematical modeling, arrival at the station

### References

1. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty: rasporyazhenie OAO “RZHD” ot 12.05.2016 № 867r. [Rules of Traction Calculations for Train Operation:

Russian Railways Order, no. 867r, dated December 05, 2016]. (In Russian)

2. Litvinova A. V., Mogila V. P. Mery povysheniya khodovoi skorosti dvizheniya gruzovykh poezdov na

zheleznodorozhnom poligone Ruzhino — Vladivostok [Measures to Increase the Running Speed of Freight Trains at the Ruzhino-Vladivostok Railway Range], *Nauchno-tekhnicheskoe i ehkonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, Technical and Economic Cooperation of the Asia-Pacific Countries in the 21st Century], 2013, vol. 2, pp. 71–76. (In Russian)

3. Mel'k V.O., Vil'gel'm A.S., Bondarevskii D.I. Povyshenie tochnosti tyagovykh raschetov s primeneniem programmy “Kompleks raschetov tyagovogo ehlektrosnabzheniya (KORTEHS)” [Improving the Accuracy of Traction Calculations Using the Program “Complex Calculations of Traction Power Supply (KORTPP)”], *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Technological Support for the Repair And Improvement of the Dynamic Qualities of Railway Rolling Stock], *Proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation in Three Parts*, Omsk, December 10–11, 2015. Part 3. Omsk: Omsk State Transport University, 2015, pp. 180–190. (In Russian)

4. Yanev Zh., et al. Modelirovanie raboty uchastka Vostochnogo poligona s ispol'zovaniem programmy MSU v usloviyakh narusheniya “normal'nogo” rezhima vedeniya poezdov [Simulation of the Operation of the Eastern Landfill Site Using the MSU Program in Conditions of Violation of the “Normal” Train Operating Mode], *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport], 2024, no. 2, pp. 13–18. (In Russian)

5. Kovalevskij I.G., et al. Optimizatsiya ehkspluatatsionnoi raboty v usloviyakh vnedreniya sovremennykh sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Optimization of Operational Work in the Context of the Introduction of Modern Interval Train Control Systems], *Nauchnye issledovaniya i innovatsii* : Sbornik statei XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Saratov, 2 sentyabrya 2021 goda [Scientific Research and Innovation:

Collection of Articles of the XI International Scientific and Practical Conference, Saratov, September 02, 2021], Saratov, 2021, pp. 57–64. (In Russian)

6. Ob utverzhdenii Metodiki opredeleniya propusknoi i provoznoi sposobnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol'zovaniya: prikaz Mintransa RF ot 18 iyulya 2018 goda №266 [On Approval of the Methodology for Determining the Throughput and Carrying Capacity of the Public Railway Transport Infrastructure: Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated July 18, 2018, no. 266]. (In Russian)

7. Levin D. Yu., Pavlov V. L. Raschet i ispol'zovanie propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog: monografiya [Calculation and Use of Railway Capacity: A Monograph], *Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte* [Educational and Methodological Center for Railway Transport Education], Moscow, 2011, 364 p. (In Russian)

8. Yazev D. V., Kostenko V. V. Issledovanie dvizheniya potoka gruzovykh poezdov [Investigation of the Flow of Freight Trains on the Approaches to the Stations of the Junction of Electric Currents], *Transport: Problems, Ideas, Prospects: Proceedings of the LXXXV All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*, Saint Petersburg, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2025, pp. 154–159. (In Russian)

9. Kostenko V.V., Yazev D.V. Modelirovanie protsessov priema gruzovogo poezdopotoka na tekhnicheskuyu stantsiyu pri razlichnykh iskhodnykh parametrah [Modeling of the Processes of Receiving Freight Train Traffic to a Technical Station with Different Initial Parameters], *Development of Infrastructure and Logistics Technologies in Transport Systems: Proceedings in Two Parts*, Saint Petersburg, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2023, pp. 247–252. (In Russian)

10. Osipov S. I., Osipov S. S. Osnovy tyagi poezdov. Uchebnik dlya studentov tekhnikumov i kolledzhei zh/d tr-ta [Fundamentals of Train Traction: A Textbook for

Students of Technical Schools and Colleges of Railway Transport], Moscow, Educational and Methodical Office of the Ministry of Railways of Russia, 2000, 592 p. (In Russian)

11. Ablyalimov O. S. Uravnenie dvizheniya poezda i nekotorye metody ego resheniya [The Equation of Train Motion and Some Methods of Its Solution], *Universum: tekhnicheskie nauki [Universum: Technical sciences]*, 2020, no. 9 (78), pp. 72–75. (In Russian)

12. Yazev D. V., Kostenko V. V. Matematicheskaya model' posektsionnogo zanyatiya gorloviny zheleznodorozhnoi stantsii s uchetom dinamiki pribyvayushchego poezda [Mathematical Model of Sectional Occupation of the Neck of a Railway Station, Taking into Account the Dynamics of an Incoming Train], *Transport: Problems, Ideas, Prospects:*

*Proceedings of the LXXXIV All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Saint Petersburg, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2024, pp. 361–366. (In Russian)

Received: April 18, 2026

Accepted: May 15, 2026

**Author's information:**

Denis V. YAZEV – Postgraduate Student;  
denchik\_yazik167@mail.ru

Vladimir V. KOSTENKO – PhD in Engineering,  
Associate Professor; docentkostenko@yandex.ru

Aleksey N. IVANKOV – PhD in Engineering,  
Associate Professor; aivankov@yandex.ru