

УДК 629.423.25

Повышение управляемости системы пневматического торможения грузового поезда

В. Ф. Танаев^{1, 2}, А. М. Рогов²

¹ ОАО «Российские железные дороги», Россия, 107174, Москва, ул. Новая Басманная, 2/1, стр. 1

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Танаев В. Ф., Рогов А. М. Повышение управляемости системы пневматического торможения грузового поезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 326–340. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-326-340

Аннотация

Цель: одним из наиболее значимых недостатков системы пневматического торможения грузовых поездов является ее плохая управляемость, обусловленная значительным разбросом характеристик тормозных приборов, значений конструктивных параметров тормозной системы, загрузки вагонов, условий сцепления колес с рельсами, а также условий окружающей среды. В статье предлагается способ повышения управляемости пневматической тормозной системы грузового поезда за счет управления процессом торможения по величине остаточной работы тормозной силы, определяемой в процессе оперативного прогнозного расчета тормозной траектории, и мгновенной тормозной мощности, контролируемой в процессе торможения. **Методы:** в работе выполнены анализ способов прогнозирования регулировочного торможения и модельный эксперимент по определению параметров прицельного регулировочного торможения поезда. **Результаты:** предложен алгоритм предварительного прогнозного расчета торможения и приведены результаты проверки способа на функциональной математической модели, подтверждающие его эффективность. **Практическое применение:** использование предложенного способа управления пневматическим торможением грузового поезда в системах автоведения позволит повысить точность управления поездом в режимах торможения, что особенно важно при организации движения поездов с применением современных технологий координатного регулирования движения.

Ключевые слова: пневматическое торможение, грузовой поезд, тормозная система, тормозная сила, управление, работа тормозной силы, отпуск тормоза, прицельное торможение

Как известно, одним из наиболее значимых недостатков системы пневматического торможения грузовых поездов является ее плохая управляемость. Процесс управления поездом дополнительно осложняется отсутствием возможности плавного регулирования тормозной силы и значительной случайной составляющей в ее зависимости от ступени торможения — ступени разрядки тормозной магистрали (ТМ).

В результате торможение даже одного и того же поезда представляет собой неста-

ционарный случайный процесс, реализации которого в разных циклах торможения могут существенно отличаться [1].

Следствием нестабильности тормозных характеристик состава поезда является невозможность достоверного прогнозирования результатов торможения при ручном управлении тормозами, что приводит к существенным потерям времени хода.

Актуальность проблемы повышения управляемости системы пневматического торможения

грузового поезда существенно возрастает при организации движения поездов с использованием современных технологий интервального регулирования. Одним из основных условий устойчивости пакетов поездов при движении в режиме виртуальной сцепки являются точный прогноз траектории перемещения каждого из поездов пакета в пространстве координат состояния и высокая точность ее реализации, которые возможны только при высокой степени управляемости поезда как в режиме тяги, так и в режиме торможения [2].

Современные системы автоведения обеспечивают ее в режиме тяги, электрического и электропневматического (для пассажирских поездов) торможения [3]. Для пневматического торможения грузовых поездов удовлетворительная точность достигается только при выполнении остановочных торможений перед запрещающим сигналом (САУТ) [4]. Задача повышения точности управления поездом при регулировочных торможениях по-прежнему остается актуальной.

Задача автоматизации управления прямым автоматическим тормозом грузового поезда впервые была поставлена Б.Д. Никифоровым в начале 80-х годов прошлого столетия [5]. Предложенная им адаптивная система прицельного торможения грузового поезда (САУТ) включала комплекс напольной и бортовой аппаратуры. Функция напольной аппаратуры (генератора импульсов) заключалась в передаче на локомотив информации о длине блок-участка, на который вступает поезд. Комплекс бортовой аппаратуры выполнял следующие функции:

- прием и запоминание информации о длине блок-участка или станционного пути;
- определение допустимой скорости движения в конце блок-участка на основании информации от путевого генератора и непрерывно принимаемых сигналов АЛСН;

- установление величины тормозного коэффициента поезда при выполнении проверки эффективности действия тормозов и других торможениях;

- определение допустимой скорости движения по блок-участку (при следовании на зеленый сигнал светофора) и формирование с учетом реальных значений тормозного коэффициента программной кривой снижения скорости до уровня ограничения или до нуля (при следовании на желтый и красный сигнал соответственно);

- поддержание программной скорости с применением нескольких ступеней торможения.

Основные принципы функционирования этого комплекса были положены в основу современной системы автоматического управления торможением (САУТ) и развиты в ней с учетом возможностей современной элементной базы. Кривая программной скорости в настоящее время рассчитывается с учетом не только тормозного коэффициента поезда, но и профиля участка пути. Последняя модификация системы (САУТ-Ц485) может взаимодействовать по CAN-интерфейсу с КЛУБ-У и другими системами безопасности, от которых в аппаратуру передается ряд дополнительных функций, поскольку именно САУТ-Ц485 имеет возможность управлять пневматическими и электропневматическими тормозами. При управлении электропневматическими тормозами система может выполнять ступенчатое торможение и отпуск, а при управлении пневматическими тормозами по условию безопасности — только ступенчатое торможение [4].

Таким образом, САУТ изначально создавалась как средство повышения безопасности движения за счет контроля действий машиниста при подъезде к светофору с ограничивающим показанием и не может решать задачи

поддержания заданной скорости в системах координатного регулирования движения поездов при отсутствии напольных устройств.

Тем не менее ряд предложенных решений (расчет программной скорости с учетом реальных характеристик поезда, взаимодействие с системой реостатного торможения локомотива, не реализованное в современных модификациях САУТ) может быть определен как прорывной для своего времени и должен использоваться для повышения управляемости системы пневматического торможения грузового поезда при организации интервального регулирования движения поездов.

В одной из первых работ, посвященной системе автоматического управления пневматическими тормозами грузового поезда на современной (микропроцессорной) элементной базе [6], предлагается пропорционально-дифференциальный регулятор скорости поезда, в котором в качестве управляющего воздействия также используется ступень разрядки тормозной магистрали. Параметры регулятора подбирались в результате исследования процессов торможения на комплексной модели пневматической тормозной системы поезда и продольных колебаний в составе. При этом использовалась детерминированная модель изменения давления в тормозных цилиндрах вагонов в процессе торможения и отпуска, что и является основным недостатком предложенного решения.

Особенностью современных систем автоматического управления поездом является, во-первых, присутствие мощного вычислительного устройства, позволяющего решать широкий круг задач, а во-вторых, наличие информации о составе поезда и профиле участка, которая может с высокой точностью рассчитывать текущие динамические характеристики объекта управления и прогнозировать их изменение.

Возможность учета результатов такого прогноза при формировании управляющего воздействия является качественным скачком в развитии систем автоматического управления движением поезда.

В микропроцессорной системе управления торможением грузовых длинносоставных поездов [7] время начала торможения и его ступень также определяются по величине расхождения между текущим и заданным значением скорости движения поезда. Однако время отпуска тормоза определяется в результате прогнозного расчета тормозной траектории движения поезда, который начинает выполняться каждые 5 с. через 30 с после начала торможения и в течение 60 с (время на отпуск и зарядку ТС). В результате расчета определяется скорость движения поезда через 60 с от текущего момента времени. Как только она достигнет заданного значения, выполняется отпуск тормоза, через 60 с после начала которого скорость движения поезда должна достигнуть заданного значения (при условии достоверности прогнозного расчета).

Безусловным достоинством предлагаемой микропроцессорной системы управления пневматическим торможением поезда является учет возмущающего воздействия (дополнительного сопротивления движению) при определении момента отпуска тормозов, что позволяет классифицировать реализуемый в предлагаемой системе принцип регулирования как комбинированный.

Основным ее недостатком является использование заранее заданных детерминированных кривых изменения тормозной силы вагонов в процессе торможения. Известно [1], что как величина установившегося давления в ТЦ вагона после окончания его наполнения, так и кривые его изменения в начале и в конце цикла торможения характеризуются

значительным разбросом, вследствие чего использование в расчете постоянной кривой изменения тормозной силы вагона приведет к значительной погрешности расчета.

В адаптивной системе автоматического управления пневматическим тормозом грузового поезда [8–10] прогнозный расчет траектории поезда в процессе торможения выполняется с использованием усредненного коэффициента трения тормозных колодок о поверхности катания колес вагонов, который определяется с помощью известной зависимости:

$$\varphi_{\text{тр}} = a \cdot \frac{v+b}{c \cdot v+b}, \quad (1)$$

где v — скорость движения, км/ч.

Коэффициенты a , b , c , d для каждого поезда определяются с применением специальной многоступенчатой процедуры идентификации на основе расширенного фильтра Калмана (ЕКФ) по результатам последовательно выполняемых торможений.

Поскольку при идентификации используются усредненные значения давления в тормозных цилиндрах вагонов, идентифицированная величина коэффициента трения колодок является обобщенной характеристикой тормозной системы поезда, соответствующей определенной ступени торможения. Поэтому такая процедура идентификации предполагает наличие пусть неизвестной, но неслучайной зависимости тормозного нажатия (давления в тормозных цилиндрах вагонов) от ступени торможения. В действительности, как показано выше, эта зависимость является случайной и характеризуется значительным разбросом даже для одной и той же ступени. Эти обстоятельства будут уменьшать точность идентификации коэффициентов формулы (1) и, соответственно, точность прогнозного расчета. Дополнительным фактором, уменьшающим эту точность,

является большой разброс параметров отпуска тормозов, значительно превышающий разброс установившихся значений давления в тормозных цилиндрах и не учитываемый при идентификации коэффициентов зависимости (1).

Разброс значений давления в тормозных цилиндрах и кривых его изменения в процессе отпуска тормозов даже одного и того же поезда при разных циклах торможения является основным фактором, затрудняющим автоматизацию управления пневматическими тормозами грузового поезда.

Очевидно, что для повышения достоверности прогнозного расчета характеристики тормозной системы поезда должны определяться в каждом цикле торможения. При этом если идентификация усредненного по составу поезда значения давления в тормозных цилиндрах может выполняться по величине тормозной силы, достоверная идентификация кривой (то есть функционала) изменения тормозной силы во времени в период отпуска представляет собой сложную математическую задачу, оперативное решение которой в бортовом вычислительном устройстве может быть затруднено.

Точность прогнозного тормозного расчета существенно повышается заменой всегда расчетного значения тормозной силы B_t как управляющего воздействия на поезд величиной ее работы A_t , выполненной в процессе торможения. В отличие от силы B_t , которая, как показано выше, является случайной величиной и в процессе управления задается только дискретно и косвенно (величиной ступени торможения), ее работа регулируется непрерывно посредством изменения времени действия силы B_t (времени отпуска тормозов).

На момент начала торможения (постановки рукоятки КМ в тормозное положение) известны начальные скорость движения поезда

v_1 и координата его головы S_1 , целевые скорость поезда v_2 и координата S_2 , типы вагонов в составе поезда и их загрузка, план и продольный профиль участка пути, на котором предполагается выполнять торможение.

Движение поезда, как и любой механической системы, описывается теоремой об изменении кинетической энергии системы тел [11], которая при условии пренебрежения потерями в межвагонных соединениях применительно к поезду в режиме торможения может быть представлена выражением:

$$\Delta E_k = A_T + A_{W_0} + A_{W_D}, \quad (2)$$

где ΔE_k — изменение кинетической энергии поезда в результате торможения, Дж;

A_T — работа тормозной силы поезда в процессе торможения, Дж;

A_{W_0} — работа сил основного сопротивления в процессе торможения, Дж;

A_{W_D} — работа сил дополнительного сопротивления в процессе торможения, Дж.

Для выполнения как тормозных, так и тяговых расчетов уравнение (2) обычно записывается в форме, соответствующей принципу Д'Аламбера:

$$M \cdot (1 + \gamma) \cdot \frac{dv}{dt} = F_k - B_T - (W_0(v) + W_D(S)), \quad (3)$$

где M — суммарная масса поезда (состава и локомотива), кг;

γ — коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс в поезде (колесные пары локомотива и вагонов, тяговые электродвигатели локомотива, подвагонные генераторы пассажирских вагонов);

F_k — сила тяги локомотива, Н;

B_T — тормозная сила поезда, Н;

$W_0(v)$ — абсолютная суммарная сила основного сопротивления движению состава и локомотива, Н;

$W_D(S)$ — абсолютная суммарная сила дополнительного сопротивления движению состава и локомотива, Н.

Изменение скорости ($v_2 - v_1$) на расстоянии ($S_2 - S_1$) может быть достигнуто при движении с постоянным ускорением:

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot (S_2 - S_1)}. \quad (4)$$

Уравнение (3) можно представить в виде:

$$B_{Ti} = -M \cdot (1 + \gamma) \cdot a - (W_0(v_i) + W_D(S_i)), \quad (5)$$

где B_{Ti} , v_i — требуемая тормозная сила и скорость движения поезда на i -м шаге интегрирования.

Интегрируя его на участке от S_1 до S_2 по интервалам пути dS , можно найти работу тормозной силы, которая требуется для снижения скорости движения до целевой v_2 к координате S_2 :

$$A_T = \int_{S_1}^{S_2} B_{Ti} \cdot dS \approx \sum_{i=1}^{\text{round}\left(\frac{S_2 - S_1}{dS}\right)} (B_{Ti} \cdot dS), \quad (6)$$

а также время торможения (время до обнуления тормозной силы B_{Ti}):

$$\Delta t_{\text{ост}} = \int_{S_1}^{S_2} \frac{dS}{v_i} \approx \sum_{i=1}^{\text{round}\left(\frac{S_2 - S_1}{dS}\right)} \left(\frac{dS}{v_i} \right). \quad (7)$$

Для выполнения этой работы необходимо в процессе торможения реализовать среднюю тормозную мощность:

$$P_{\text{тср}} = \frac{A_T}{\Delta t_{\text{ост}}}. \quad (8)$$

Если выполняется условие $P_{\text{тср}} \leq P_{\text{пр}}$, где $P_{\text{пр}}$ — мощность реостатного тормоза локомотива, торможение может осуществляться с использованием только реостатного тормоза. В противном случае требуется применение автоматических прямодействующих пневматических тормозов.

Поскольку в уравнение (5) не входят параметры тормозной системы поезда, действительная величина работы (6), а также точность ее расчета не зависят ни от тормозных характеристик отдельных вагонов и поезда в целом, ни даже от способа торможения. Точность интегрирования уравнения (5) определяется точностью определения основного $W_0(v)$ и дополнительного $W_d(S)$ сопротивления движению

поезда, а также точностью информации о загрузке вагонов (массе поезда M).

Если предположить, что тормозная сила обнуляется в момент перевода рукоятки КМ в отпускное положение и торможение выполняется однократно, управление циклом торможения может осуществляться следующим образом (рис. 1, а).

Предварительно при следовании поезда в режиме тяги или выбега периодически

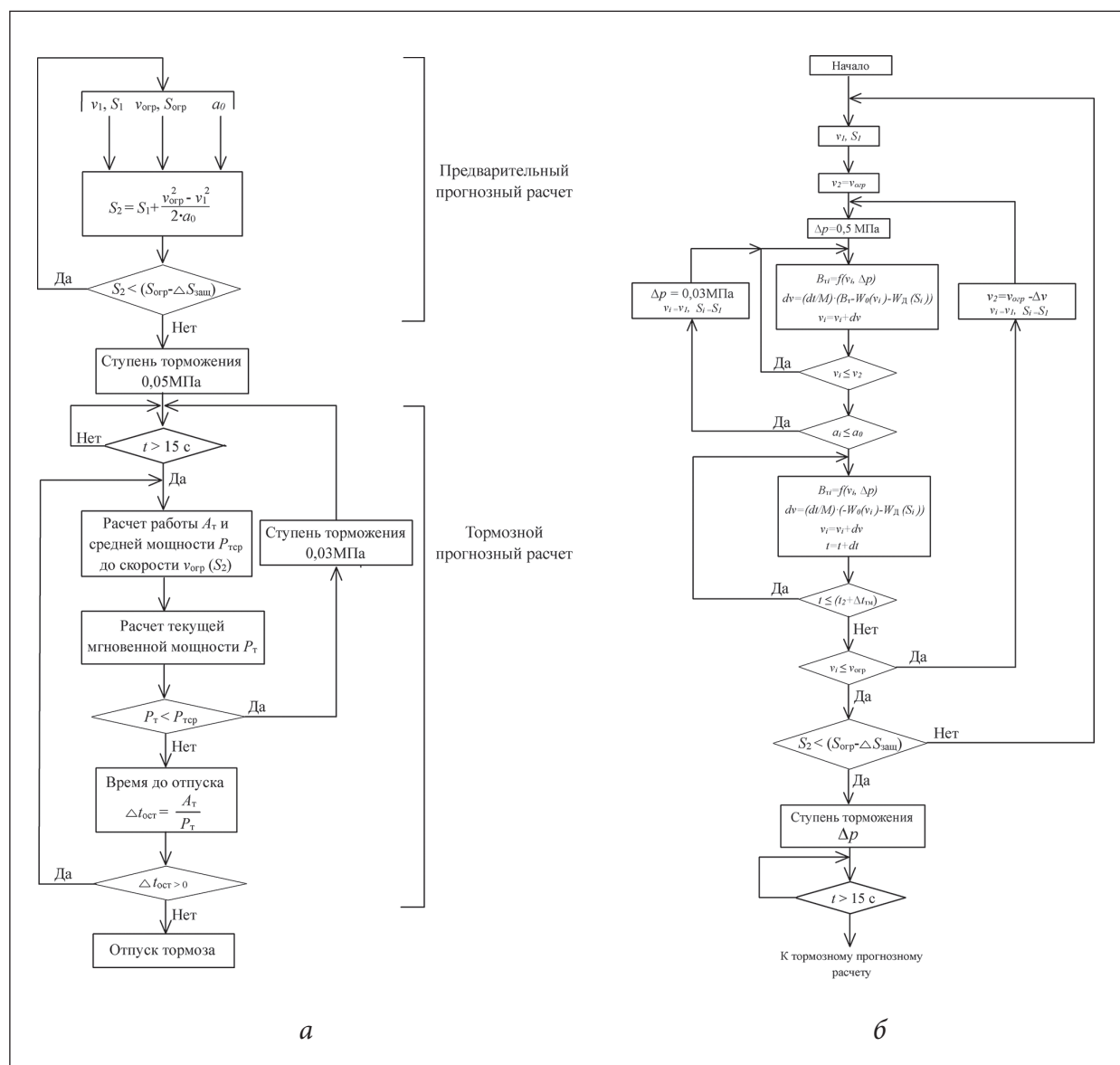


Рис. 1. Схема алгоритма: а — управления циклом торможения; б — предварительного прогнозного расчета

выполняется прогнозный расчет тормозной траектории, в процессе которого определяются прогнозная координата S_2 , соответствующая достижению заданной скорости $v_{огр}$ при торможении с постоянным заданным отрицательным ускорением α_0 . Величина α_0 для каждой координаты пути определяется исходя из обеспечения допустимого уровня продольно-динамических реакций в составе поезда с помощью любого из известных критериев [3, 12].

Если значение S_2 , полученное в результате прогнозного расчета, превышает координату границы участка ограничения скорости с учетом длины защитного участка ΔS_3 ($S_2 > (S_{огр} - \Delta S_3)$), выполняется торможение ступенью 0,05 МПа.

Через время τ_1 (длительность периода подготовки тормозов к действию) после начала снижения давления в ТМ запускается программный цикл, в ходе которого:

- проверяется выполнение условия $t_k \geq (t_k + \Delta t_{ост})$, где t_k — текущее время, соответствующее текущей координате S_k , в случае его выполнения производится отпуск тормоза и прекращение выполнения цикла;
- выполняется прогнозный расчет (5–8), в результате которого определяются значения оставшихся до конца цикла торможения (достижения скорости v_2) требуемых значений работы тормозной силы A_{tk} , оставшегося времени торможения $\Delta t_{остk}$, средней тормозной мощности $P_{тсрк}$, а также текущей тормозной мощности $P_{tk} = (-M \cdot (1 + \gamma) \cdot \alpha - (W_0(v_k) + W_d(v_k)))$, где индекс k соответствует текущей координате S_k и скорости v_k .
- проверяется условие $P_{tk} \geq P_{тсрк}$, в случае его невыполнения в течение 5 с. осуществляется дополнительная ступень торможения глубиной 0,03 Мпа с последующей проверкой этого условия через время τ_1 ;
- определяется новое прогнозное значение момента времени начала отпуска тормоза

$$t_{отнк} = t_k + \frac{A_{tk}}{P_{tk}}.$$

Цикл повторяется до момента выполнения условия $t_k \geq t_{отнк}$, которое будет соответствовать моменту достижения скорости v_2 на координате $S_k \leq S_2$.

Последнее условие обеспечивается выполнением условия $P_{tk} \geq P_{тсрк}$ в течение всего времени торможения.

При реализации алгоритма управления торможением, представленного на рис. 1, а, необходимо учитывать ряд важных замечаний:

1. В [5] рекомендуется выполнять торможение начальной ступенью 0,07–0,08 МПа, однако следствием применения увеличенной ступени снижения давления в тормозной магистрали может быть превышение заданной величины отрицательного ускорения α_0 и увеличения уровня продольно-динамических реакций в составе поезда. С другой стороны, применение минимальной начальной ступени при торможении на затяжном уклоне может привести к недостаточной эффективности применения тормоза и проезду координаты S_2 со скоростью, превышающей v_2 .

Поэтому желательно на стадии предварительного прогнозного расчета выполнять оценку величины требуемой ступени торможения Δp , для чего необходимо располагать регрессионной зависимостью $B_T = f_B(v, \Delta p)$, уникальной для каждого поезда.

2. Описанный алгоритм позволяет обеспечить высокую точность управления пневматическим тормозом грузового поезда при условии справедливости сделанного выше допущения об обнулении тормозной силы в момент отпуска. Однако такое допущение не соответствует реальному процессу отпуска тормоза, который занимает продолжительное время, причем снижение давления в тормозных цилиндрах и,

соответственно, уменьшение тормозной силы начинается по истечении 20 с и более от момента перевода рукоятки КМ в отпускное положение [13].

Поэтому полное остаточное время торможения $\Delta t_{\text{отпк}}$ на текущий момент t_k отличается от времени до начала отпуска $\Delta t_{\text{отпк}}$, которое учитывает работу $\Delta A_{\text{отп}}$ тормозной силы, выполняемую в течение отпуска ($\Delta t_{\text{отпк}} < \Delta t_{\text{отрк}}$):

$$\begin{aligned} A_{\text{тк}} &= A'_{\text{тк}} + \Delta A_{\text{отп}} \rightarrow A'_{\text{тк}} = A_{\text{тк}} - \Delta A_{\text{отп}}, \\ t_{\text{отпк}} &= t_k + \Delta t_{\text{отпк}} \rightarrow t_{\text{отпк}} = t_k + \frac{A'_{\text{тк}}}{P_{\text{тк}}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $A_{\text{тк}}$ — работа тормозной силы, которая должна быть выполнена до окончания отпуска, Дж;

$\Delta A_{\text{отп}}$ — работа тормозной силы, которая будет выполнена после перевода рукоятки КМ в отпускное положение, Дж;

$A'_{\text{тк}}$ — работа тормозной силы, которая должна быть выполнена до начала отпуска, Дж;

$P_{\text{тк}}$ — средняя тормозная мощность, которая должна развиваться от текущего момента t_k до окончания отпуска, кВт.

Предполагаемая на текущий момент времени t_k скорость начала отпуска:

$$v'_{2k} = v_k + \alpha_k \cdot \Delta t_{\text{отпк}}, \quad (10)$$

где v_k, α_k — текущие значения скорости и ускорения поезда, м/с, м/с².

Основными факторами, определяющими величину работы $\Delta A_{\text{отп}}$, являются установившееся после окончания наполнения тормозных цилиндров вагонов значение тормозной силы поезда B'_t , эквивалентное среднему давлению в ТЦ вагонов; скорость начала отпуска v'_t и скорость окончания отпуска (окончания опорожнения тормозных цилиндров) $v_{\text{отп}}$. При однократном торможении можно принять $v_{\text{отп}} = v_2$.

Поскольку B'_t является случайной величиной, значение работы $\Delta A_{\text{отп}}$ также является случайной величиной, отличающейся в разных циклах торможения одного и того же поезда даже при одинаковых ступенях торможения. Ее текущая оценка может быть выполнена с использованием уравнения регрессии вида $\Delta A_{\text{отпк}} = f_A(B'_t, v'_{2k}, v_{\text{отп}})$, коэффициенты которого уточняются по данным нескольких циклов торможения.

3. Предположение об однократном торможении и окончании отпуска при скорости v_2 соответствует выполнению условия $W_{\text{д}}(S_2) \geq 0$, которое исключает увеличение скорости движения поезда после окончания отпуска и необходимость выполнения повторных регулировочных торможений. Если это предположение не выполняется, при определении момента отпуска необходимо учитывать последующее увеличение скорости поезда в течение времени $\Delta t_{\text{тм}}$, необходимого для зарядки тормозной системы. В этом случае скорость окончания отпуска должна выбираться таким образом, чтобы при последующем разгоне поезда в течение времени $\Delta t_{\text{тм}}$ скорость не успела превысить заданное значение $v_{\text{огр}}$. При наличии на локомотиве электрического тормоза он может использоваться для ограничения ускорения поезда в течение времени $\Delta t_{\text{тм}}$.

С учетом этих замечаний предлагается следующий алгоритм управления прицельным торможением грузового поезда.

На первом этапе в процессе движения поезда выполняется предварительный прогнозный расчет, в ходе которого решаются следующие задачи:

1. Определяется ступень торможения Δr , необходимая для снижения скорости движения поезда от текущего значения v_1 до заданного значения v_2 с заданным для текущей координаты S_1 значением среднего

отрицательного ускорения α_0 , и соответствующая v_2 координата S_2 ;

2. Определяется скорость окончания отпуска $v_{\text{отп}}$ тормоза $v_{\text{отп}} \leq v_2$, учитывающая возможный последующий разгон поезда до v_2 в течение времени $\Delta t_{\text{тм}}$, величина которого может быть принята равной 60 с.

На этом этапе тормозная траектория поезда определяется в результате интегрирования основного уравнения его движения, представленного в виде:

$$dv = \frac{dt}{M \cdot (1 + \gamma)} \left(-B_{\tau} - (W_0(v) + W_d(S)) \right). \quad (11)$$

Схема алгоритма предварительного прогнозного расчета представлена на рис. 1, б. Во внутреннем цикле алгоритма решается первая задача, во внешнем цикле — вторая. При определении требуемой ступени торможения используется регрессионная зависимость $B_{\tau} = f_B(v, \Delta p)$, коэффициенты которой определены по результатам проверки эффективности действия тормоза. Порядок определения коэффициентов этой регрессии выходит за рамки данной работы и является предметом отдельного обсуждения. При решении второй задачи в качестве тормозной силы B_{τ} используется усилие реостатного тормоза при его наличии на локомотиве, в противном случае принимается $B_{\tau} = 0$.

Если значение S_2 , полученное в результате предварительного прогнозного расчета, превышает координату границы участка ограничения скорости с учетом длины защитного участка ΔS_3 ($S_2 > (S_{\text{отп}} - \Delta S_3)$), выполняется торможение ступенью Δp .

Через 15 с после выполнения торможения начинает периодически выполняться основной прогнозный расчет, схема алгоритма которого приведена на рис. 1, а. При этом в качестве заданной скорости в процессе торможения используется скорость $v_{\text{отп}}$, а текущая оценка

времени отпуска $t_{\text{отпк}}$ рассчитывается с учетом текущей оценки работы отпуска $\Delta A_{\text{отпк}}$, вычисленной с использованием регрессионной зависимости $\Delta A_{\text{отпк}} = f_A(B'_{\tau}, v'_{2k}, v_{\text{отп}})$, задача определения которой выходит за рамки данной работы.

С целью проверки эффективности предлагаемого способа управления торможением грузового поезда была разработана функциональная математическая модель тормозной системы поезда. Кривые наполнения и опорожнения тормозных цилиндров вагонов моделировались дискретными кривыми с учетом скорости распространения тормозной и отпускной волн [5]. Поскольку предлагаемый способ предполагает непрерывный контроль энергетических характеристик каждого цикла торможения, разброс параметров процессов наполнения и опорожнения тормозных цилиндров в разных циклах торможения, оказывающий влияние на эти характеристики, будет учитываться при определении времени отпуска тормоза.

Помимо предлагаемого способа управления пневматическим тормозом, в модели реализован оригинальный алгоритм совместного использования пневматического и реостатного тормоза локомотива, описание которого выходит за рамки данной работы.

На рис. 2 представлены результаты моделирования прицельного регулировочного торможения поезда массой 5600 т на уклоне 0,005. Для удобства отображения разновеликих параметров на рисунке представлены изменения их относительных значений.

Как следует из рисунка, за 400 м до расчетной целевой координаты, определяемой по заданной координате начала участка ограничения 5000 м (пунктирная линия) с учетом длины защитного участка, увеличивается тормозная мощность реостатного тормоза (до этой

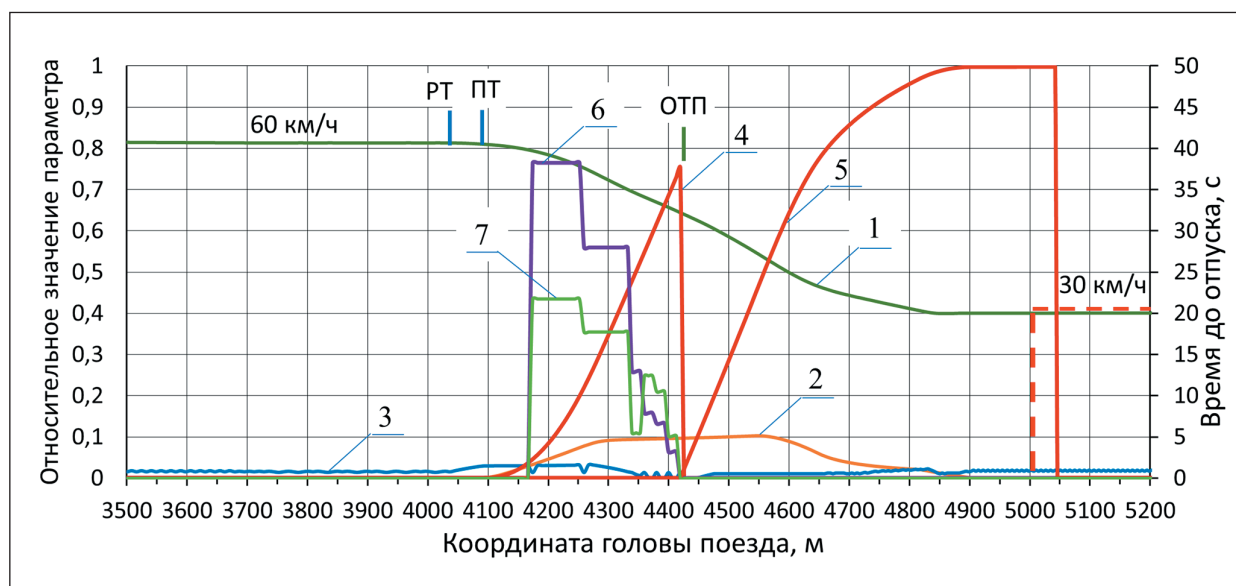


Рис. 2. Процесс прицельного регулировочного торможения поезда массой 5600 т на уклоне 0,005: 1 — скорость движения; 2 — тормозная сила пневматического тормоза поезда; 3 — тормозная сила электрического тормоза; 4 — выполненная работа тормозной силы пневматического тормоза в процесс торможения до отпуска; 5 — выполненная работа тормозной силы пневматического тормоза после начала отпуска; 6 — оценка работы тормозной силы до начала отпуска по результатам прогнозного расчета; 7 — оценка времени до начала отпуска

точки реостатный тормоз использовался для поддержания максимальной разрешенной скорости следования по участку, равной 60 км/ч) для сжатия состава, после чего выполняется торможение ступенью, определенной в результате предварительного прогнозного расчета.

В процессе торможения реостатный тормоз локомотива не выключается и работает как регулятор заданного отрицательного ускорения ($-0,15 \text{ м/с}^2$).

Через 5 с после начала торможения в результате основного прогнозного расчета выполнена оценка работы тормозной силы до начала отпуска (линия 6) и времени, оставшегося до начала отпуска (линия 7 — примерно 22 с). Через 5 с выполняется новый прогнозный расчет, результатом которого являются уменьшенные оценки оставшейся работы тормозной силы и времени до отпуска.

При уменьшении времени до нуля выполняется отпуск тормоза с одновременным увеличением мощности реостатного тормоза на 10% для сдерживания головной части поезда в процессе отпуска. При этом величина работы, выполненной от момента начала торможения до момента окончания отпуска (линия 4), соответствует ее первоначальной прогнозной оценке (линия 6) с точностью до нескольких процентов, что обеспечило соответствие заданной целевой координате (с учетом защитного участка) практически без перерегулирования по скорости.

Существенно более сложная задача решается системой управления в ситуации, результаты моделирования которой представлены на рис. 3. На уклоне крутизной 0,01 мощности реостатного тормоза недостаточно для стабилизации максимальной скорости,

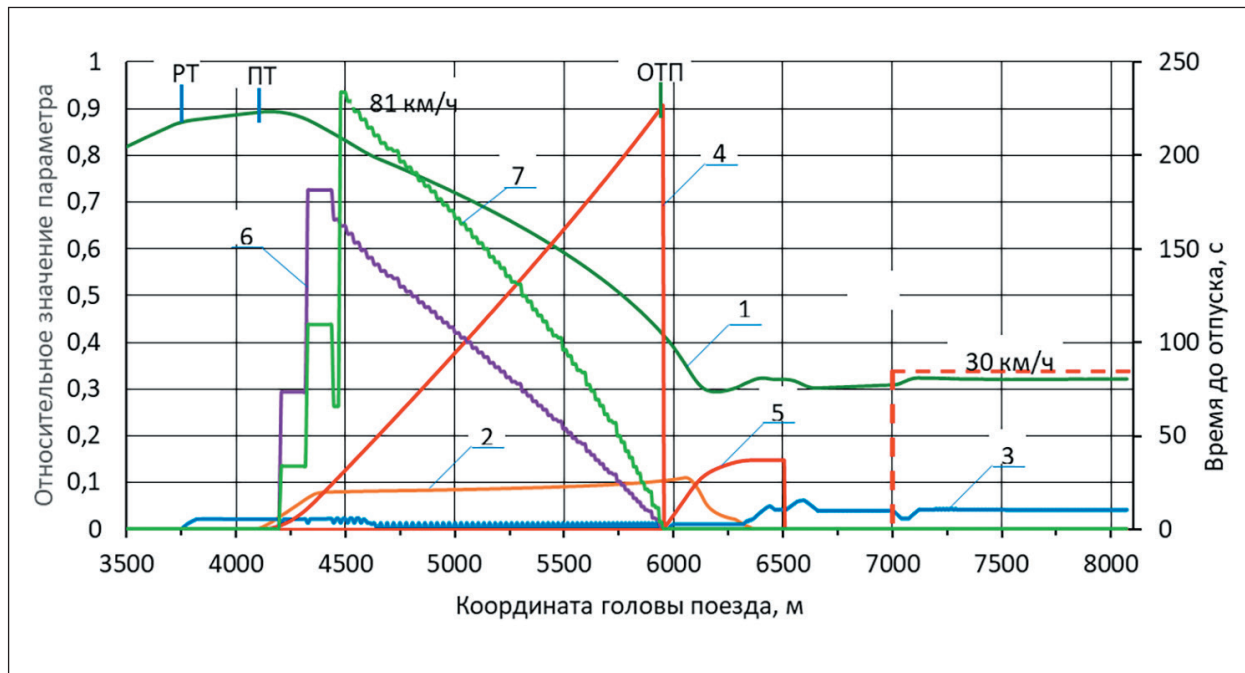


Рис. 3. Процесс прицельного регулировочного торможения поезда массой 5600 т на уклоне 0,010. Экспликация соответствует рис. 2

установленной на участке (80 км/ч). При ее достижении в процессе разгона после предыдущего торможения включился регулятор скорости на основе реостатного тормоза, который вывел тормоз на максимальную мощность (линия 3 на отметке примерно 3750 м), обеспечив предварительное сжатие состава.

При достижении скорости 81 км/ч выполнена ступень пневматического торможения 0,05 МПа, которая была определена предварительным прогнозным расчетом для торможения до целевой скорости с ускорением $-0,15 \text{ м/с}^2$. Поскольку торможение выполнялось для ограничения скорости, заданная скорость в момент торможения была установлена равной 80 км/ч, поэтому в результате основного прогнозного расчета, выполненного через 15 с после начала торможения, получена минимальная оценка требуемой работы торможения (линия 6).

Однако расчетная координата окончания зарядки тормозной системы после тормо-

жения, определенная в результате этого же расчета, превысила величину целевой координаты (7000 м). Это означает, что в случае выполнения регулировочного торможения на максимальную допустимую скорость 80 км/ч тормозная система не успеет зарядиться для выполнения прицельного торможения на координату 7000 м, поэтому уже в процессе торможения заданная скорость была изменена на целевую (30 км/ч), а торможение продолжилось с минимальным ускорением.

Показательной особенностью предлагаемого алгоритма является изменение ошибки оценки остаточной работы, которая должна быть выполнена до начала отпуска. На отметке 4300 м она составляла примерно 18% за счет использования в прогнозном расчете постоянного заданного отрицательного ускорения $-0,15 \text{ м/с}^2$. На отметке 5000 м ошибка уже не превышала 8%, на отметке 5500 м уменьшилась до 3%.

Таким образом, осуществляется непрерывный контроль процесса торможения в каждом цикле, что позволяет существенно уменьшить влияние разброса и неустойчивости характеристик тормозной системы поезда на точность управления торможением.

По результатам представленной работы могут быть сделаны следующие выводы:

1. Несмотря на расширение функциональных возможностей современных систем автоведения и повышение точности управления поездом в режимах тяги и торможения, проблема повышения управляемости системы пневматического торможения грузового поезда по-прежнему является актуальной.

2. Вычислительные возможности бортовых комплексов современных локомотивов позволяют осуществлять прогнозный расчет тормозной траектории поезда с использованием результатов идентификации характеристик тормозной системы поезда.

3. Значительный разброс и случайный характер изменения тормозных характеристик состава поезда обуславливают необходимость их идентификации в каждом цикле торможения.

4. Повышение управляемости пневматической тормозной системы грузового поезда может быть достигнуто за счет управления процессом торможения по величине остаточной работы тормозной силы, определяемой в процессе оперативного прогнозного расчета тормозной траектории, и мгновенной тормозной мощности, контролируемой в процессе торможения.

5. Предложены способ повышения управляемости пневматической тормозной системы грузового поезда за счет учета энергетических характеристик тормозного цикла и алгоритм его реализации.

6. Предварительные результаты проверки предложенного способа управления пневма-

тическим торможением грузового поезда на математической модели подтвердили его работоспособность и высокую эффективность.

7. Применение предложенного способа управления пневматическим торможением грузового поезда в системах автоведения позволит повысить точность управления поездом в режимах торможения.

Список источников

1. Танаев В.Ф. Повышение управляемости тормозов грузовых поездов за счет применения электрического торможения // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Ремонт и динамика'25» (Омск, 15–17 октября 2025 год). Омск: ОмГУПС, 2025. С. 295–303.

2. Бушуев С. В. Методы повышения пропускной и провозной способности участков железных дорог техническими средствами автоматики: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2025. 364 с.

3. Жухин О.Н. Совершенствование системы автоматического управления скоростью грузового поезда: дис. ... канд. техн. наук. М.: РУТ МИИТ, 2024. 178 с.

4. Аппаратура локомотивная системы автоматического управления торможением поездов САУТ-ЦМ/485: руководство по эксплуатации: в 3 ч. 97Ц.06.00.00-01 РЭ.

5. Никифоров Б.Д., Головин В.И., Кутыев Ю.Г. Автоматизация управления торможением поездов. М.: Транспорт, 1985. 263 с.

6. Лосев В.В. Автоматическое микропроцессорное управление пневматическими тормозами грузового поезда: дис. ... канд. техн. наук. М., 1996. 210 с.

7. Пудовиков О.Е., Муров С.А. Микропроцессорная система автоматического управления пневматическим торможением грузовых длинносоставных поездов // Электротехника. 2014. № 8. С. 29–33.

8. Пудовиков О.Е., Менакер Г. М. Система управления пневматическим тормозом грузового поезда // *Электротехника*. 2023. № 9. С. 34–39.
9. Пудовиков О.Е., Менакер Г.М. Автоматическое управление пневматическим тормозом грузового поезда // *Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Международной научно-практической конференции (Москва, 25 мая 2023 года)*. М.: Российский университет транспорта, 2023. С. 322–329.
10. Менакер Г.М., Пудовиков О.Е. Адаптивная система автоматического управления пневматическим тормозом грузового поезда // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2025. № 2. С. 132–144.
11. Френкель С.Я. Техника тяговых расчетов: учебное пособие. Гомель: Изд-во Белорусского государственного университета транспорта, 2005. 80 с.
12. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Чесноков И. И. Динамика вагона: учеб. для вузов железнодорожного транспорта. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1991. 360 с.
13. К вопросу учета инерционности тормозной системы грузового поезда при выполнении тяговых и тормозных расчетов / Д. Н. Курилкин [и др.] // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2025. Т. 22, № 3. С. 594–604.

Дата поступления: 13.03.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

ТАНАЕВ Валерий Фаритович — зам. генерального директора, главный инженер ОАО «РЖД», профессор кафедры «Электрическая тяга»; lt@pgups.ru
РОГОВ Александр Михайлович — аспирант; sasharogov09@mail.ru

Improving of Controllability for Freight Train Pneumatic Braking System

V. F. Tanaev^{1, 2}, A. M. Rogov²

¹JSC “Russian Railways”, 1 Novaya Basmannaya st., Moscow, 107174, Russia

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Tanaev V. F., Rogov A. M. Improving of Controllability for Freight Train Pneumatic Braking System // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 326–340. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-326-340 (In Russian)

Abstract

Objective: one of the most significant drawbacks of the pneumatic braking system of freight trains is its poor controllability, due to a significant variation in the characteristics of the braking devices, the values of the structural parameters of the braking system, the loading of cars, the conditions of adhesion of wheels with rails, as well as environmental conditions. The article proposes a method of increasing controllability of a pneumatic braking system of a freight train by controlling the braking process by the value of residual brake force operation determined in the process of operational forecast calculation of the braking trajectory, and instantaneous braking power controlled in the process of braking. **Methods:** the paper analyzes methods for predicting regulatory braking and construct a model experiment to determine

the parameters of targeting regulatory braking for trains. **Results:** an algorithm for preliminary predictive braking calculation is proposed, and the results of testing the method on a functional mathematical model are presented, confirming its effectiveness. **Practical Importance:** the results of checking the method on a functional mathematical model confirming its effectiveness are given. Application of proposed method of control of pneumatic braking of freight train in automatic driving systems will make it possible to increase accuracy of train control in braking modes, which is especially important in arrangement of train movement using modern technologies of coordinate control of movement.

Keywords: pneumatic braking, freight train, braking system, braking force, control, brake force operation, brake release, aimed braking

References

1. Tanaev V.F. Povyshenie upravlyaemosti tormozov gruzovykh poezdov za schet primeneniya elektricheskogo tormozheniya [Increasing the controllability of the brakes of freight trains due to the use of electric braking], *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava Materialy VII vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Remont i dinamika 25" [Technological support for repair and increasing the dynamic qualities of railway rolling stock, Materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation Repair and dynamics' 25, Omsk, October 15–17, 2025]*, Omsk, 2025, pp. 295–303. (In Russian)
2. Bushuev S. V. Metody povysheniya propusknoj i provoznoj sposobnosti uchastkov zheleznykh dorog tekhnicheskimi sredstvami avtomatiki: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methods of Increasing the Throughput and Carrying Capacity of Railway Sections by Technical Means of Automation: dis. ... Dr. Sci. in Engineering], Saint Petersburg, 2025, 364 p. (In Russian)
3. Zhukhin O.N. Sovershenstvovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu gruzovogo poezda: diss. ... kand tekhn. nauk [Improvement of the Automatic Control System for the Speed of a Freight Train, dis. ... Dr. Sci. in Engineering], *Russian University of Transport (RUT MIIT)*, Moscow, 2024, 178 p. (In Russian)
4. Apparatura lokomotivnaya sistemy avtomaticheskogo upravleniya tormozheniem poezdov SAUT-TsM/485 [Locomotive Equipment of the Automatic Braking Control System of SAUT-TsM/485 trains], *Operation manual in 3 parts. 97TS.06.00.00-01 RE* (In Russian)
5. Nikiforov B.D., et al. Avtomatizatsiya upravleniya tormozheniem poezdov [Automation of Train Braking Control] Moscow, *Transport*, 1985, 263 p. (In Russian)
6. Losev V. V. Avtomaticheskoe mikroprotsessornoe upravlenie pnevmaticheskimi tormozami gruzovogo poezda [Automatic Microprocessor Control of Pneumatic Brakes of a Freight Train], dis. ... Dr. Sci. in Engineering, Moscow, 1996, 210 p. (In Russian)
7. Pudovikov O.E., Murov S.A. Mikroprotsessornaya sistema avtomaticheskogo upravleniya pnevmaticheskimi tormozheniem gruzovykh dlinnosostavnykh poezdov [Microprocessor Automatic Control System for Pneumatic Braking of Long-Component Freight Trains], *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 2014, no. 8, pp. 29–33. (In Russian)
8. Pudovikov O.E., Menaker G.M. Sistema upravleniya pnevmaticheskimi tormozom gruzovogo poezda [Control System for the Pneumatic Brake of a Freight Train], *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 2023, no. 9, pp. 34–39. (In Russian)
9. Pudovikov O.E., Menaker G.M. Avtomaticheskoe upravlenie pnevmaticheskimi tormozom gruzovogo poezda [Automatic Control of the Pneumatic Brake of a Freight Train], *Intellektual'nye transportnye sistemy: Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii [Intelligent Transport Systems: Materials of the II International Scientific and Practical Conference,*

May 25, 2023], Moscow, Russian University of Transport, 2023, pp. 322–329. (In Russian)

10. Menaker G.M., Pudovikov O.E. Adaptivnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya pnevmaticheskim tormozom gruzovogo poezda [Adaptive Automatic Control System for the Pneumatic Brake of a Freight Train], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railways], 2025, no. 2, pp. 132–144. (In Russian)

11. Frenkel S. Ya. Tekhnika tyagovykh raschetov: uchebnoe posobie [Traction Calculation Technique: a textbook], Gomel, *Publishing House of the Belarusian State University of Transport*, 2005, 80 p. (In Russian)

12. Vershinskij S.V., Danilov V.N., Chesnokov I.I. Dinamika vagona: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Dynamics of the Car: Textbook for Universities Railway Transport], 3rd edit., revised and expanded, Moscow, *Transport*, 1991, 360 p. (In Russian)

13. Kurilkin D.N., et al. K voprosu ucheta inertsionnosti tormoznoj sistemy gruzovogo poezda pri vypolnenii tyagovykh i tormoznykh raschetov [On the Issue of Taking into Account the Inertia of the Brake System of a Freight Train when Performing Traction and Brake Calculations], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University], 2025, vol. 22, no. 3, pp. 594–604. (In Russian)

Received: March 13, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Valerij F. TANAEV — Deputy General Director, Chief Engineer of Russian Railways, Professor of the Department “Electric Propulsion”; lt@pgups.ru
Alexander M. ROGOV — Postgraduate Student; sasharogov09@mail.ru