

Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.424.5

doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-45-54

АНАЛИЗ ТИПОВ НЕРОВНОСТЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ МАНЕВРОВЫХ ЛОКОМОТИВОВ

Павел Сергеевич Григорьев^{1✉}, Нозимжон Солиевич Кодиров²

^{1,2} Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

¹ grigorev.p@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5841-341X>

² nazimzhank@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4855-0637>

Аннотация

В статье рассматривается влияние различных типов стыковых неровностей железнодорожного пути на динамическую нагруженность несущих конструкций маневровых локомотивов. Проведен анализ отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих расчетные неровности. В исследовании использован программный комплекс «Универсальный механизм», с помощью которого выполнено моделирование динамических нагрузок при движении локомотива ТЭМ2 по путям с различными типами неровностей. Результаты расчетов показали, что введение в модель стыковых неровностей приво-

дит к увеличению коэффициента вертикальной динамики при низких скоростях движения, что характерно для маневровых локомотивов. Максимальные значения коэффициента динамики получены при скорости 25 км/ч. Полученные результаты подтверждают необходимость учета стыковых неровностей при оценках динамической нагруженности подвижного состава и прогнозировании его остаточного ресурса.

Ключевые слова: локомотив, нагруженность, неровности, коэффициент динамики, железнодорожный путь, кинематические возмущения, ресурс.

Благодарности: коллектив авторов выражает благодарность профессору, доктору технических наук Оганьяну Эдуарду Сергеевичу (АО «ВНИКТИ») за его любезную помощь и полезные предложения. Авторы также выражают признательность доценту, кандидату технических наук Сакало Алексею Владимировичу (ФГБОУ ВО «БГТУ»).

Ссылка для цитирования:

Григорьев П.С. Анализ типов неровностей при оценке динамической нагруженности маневровых локомотивов / П.С. Григорьев, Н.С. Кодиров // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 8. – С.45-54. doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-45-54.

Original article

Open Access Article

ANALYSIS OF IRREGULARITIES TYPES IN ASSESSING THE DYNAMIC LOAD OF SHUNTING LOCOMOTIVES

Pavel Sergeevich Grigoriev^{1✉}, Nozimjon Solievich Kodirov²

^{1,2} Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ grigorev.p@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5841-341X>

² nazimzhank@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4855-0637>

Abstract

The paper considers the influence of various types of butt irregularities of the railway track on the dynamic loading of load-bearing structures of shunting locomotives. Domestic and foreign documents regulating the

calculated irregularities are analyzed. The study uses the Universal Mechanism software package, which is applied to simulate dynamic loads during the movement of TEM2 locomotive along tracks with different types of irregulari-

ties. The calculation results show that the introduction of butt irregularities into the model leads to an increase in the vertical dynamics coefficient at low speeds, which is typical for shunting locomotives. The maximum values of the dynamics coefficient are obtained at the speed of 25 km/h. The results obtained confirm the need to take into account

butt irregularities when estimating the dynamic load of a rolling stock and predicting its residual life.

Keywords: locomotive, load, irregularities, coefficient of dynamics, railway track, kinetic disturbances, resource.

Acknowledgements: the authors expresses its gratitude to Professor, Doctor of Technical Sciences Oganian Eduard Sergeevich (VNIKTI) for his kind help and useful suggestions. The authors also express their gratitude to Associate Professor, Candidate of Technical Sciences Sakalo Aleksey Vladimirovich (BSTU).

Reference for citing:

Grigoriev PS, Kodirov NS. Analysis of irregularities types in assessing the dynamic load of shunting locomotives. *Transport Engineering*. 2025;8:45-54. doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-45-54.

Введение

Маневровые локомотивы играют важную роль в промышленной логистике, обеспечивая перемещение грузов на территории предприятий [1]. Однако их эксплуатация часто происходит в условиях, далеких от нормативных. Зачастую подъездные пути находятся в удовлетворительном состоянии [2, 3]. Это приводит к увеличению динамической нагруженности несущих конструкций маневровых локомотивов, что может вызывать повреждения усталостного характера [4]. В традиционных методах оценки динамической нагруженности используются данные, полученные с вагонов путеизмерителей [5] которые, как правило, не применяют для оценок состояния железнодорожного пути на промышленных предприятиях, или при помощи генерации неровностей на основе статистических подходов [6]. Стоит отметить, что опыт изучения работы маневровых локомотивов показывает, что наибольший вклад в динамическую нагруженность вносят стыковые неровности, особенно при движении на низких скоростях [7]. Именно низкие скорости движения характерны для маневровых локомотивов, эксплуатируемых на путях промышленных предприятий. Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью

разработки более точных методов оценки остаточного ресурса, учитывающих специфические условия эксплуатации маневровых локомотивов.

Целью настоящего исследования является изучение влияния различных видов возмущений, применимых при компьютерном моделировании динамики подвижного состава, на динамическую нагруженность несущих конструкций маневровых для совершенствования методологии оценки их остаточного ресурса с учетом специфики эксплуатации на путях промышленных предприятий.

Для достижения поставленной цели предлагается:

- рассмотреть виды неровностей, используемых при моделировании динамики подвижного состава;
- оценить динамическую нагруженность несущего узла маневрового локомотива при различных видах расчетных неровностей с различными скоростями движения;
- провести анализ и дать рекомендации о применении расчетных видов неровностей железнодорожного пути при оценках динамической нагруженности несущих узлов маневровых локомотивов.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Рассмотрим типы кинематических возмущений, применяемые при моделировании динамики подвижного состава. В большинстве случаев в математической модели в качестве внешних воздействий учитываются кинематические возмущения, описывающие неровности железнодорожно-

го пути. Используемые кинематические возмущения задаются в виде случайных, периодических функций или реальных неровностей, полученных на основе данных с вагона-путеизмерителя. Знакомство с научной и нормативной литературой показывает, что в настоящее время существует небольшое

количество документов, регламентирующих способы представления возмущающих функций для решения задач динамики подвижного состава. В частности, на территории Российской Федерации применяются два основных нормативных документа, в которых описываются неровности рельсо-

вых нитей для решения динамических задач: РД 32.68-96 [8] и ПНСТ 511-2020 [9].

Расчетные неровности железнодорожного пути для оценки показателей динамических показателей стандарта ПНСТ 511-2020 приведены в результате интерполяции сплайном натурных неровностей рельсовых нитей участка железнодорожного пути.

Допустимые значения отступлений в геометрии рельсовой колеи

Table 1

Permissible deviation values in the geometry of the railway track gauge

Скорость движения, км/ч	Масштабный коэффициент
От 90 до 140 включительно	1,0
От 81 до 90 включительно	1,3
От 61 до 80 включительно	1,5
От 26 до 60 включительно	1,6

В отличие от стандарта ПНСТ 511-2020 в руководящем документе РД 32.68-96 устанавливаются способы представления возмущений от неровностей железнодорожного пути, в виде спектральной плотности неровностей. При моделировании системы «путь-экипаж» с учетом скоростей единиц подвижного состава особое внимание обра-

щается на частотные области расчетных возмущений колебаний экипажа со стороны пути. На примере частотного диапазона 0–10 Гц рассмотрим функцию спектральной плотности эквивалентной расчетной неровности, которая аналитически выражается следующим образом

$$\bar{G}\eta(f) = \frac{b_1 V^{\gamma_i-1}}{f^{\gamma_i}} + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=1}^m \frac{a_j}{\alpha_j V} \exp\left[-\frac{(f - \beta_j V)^2}{4\alpha_j^2 V^2}\right] \quad (1)$$

$$i = 1 \text{ при } f \leq f_1;$$

$$i = 2 \text{ при } f_1 \leq f \leq f_2;$$

$$i = 3 \text{ при } f \geq f_2;$$

$$f_1 = \exp\left(\frac{\ln b_1 - \ln b_2}{\gamma_1 - \gamma_2} + \ln V\right); \quad (2)$$

$$f_2 = \exp\left(\frac{\ln b_2 - \ln b_3}{\gamma_2 - \gamma_3} + \ln V\right), \quad (3)$$

где $\bar{G}\eta(f)$ – функция спектральной плотности эквивалентной неровности для пути среднего состояния, рассчитывающейся комбинационными параметрами, приведенными в руководящем документе, мм/Гц; a_j , α_j , b_1 , γ_j , β_j – параметры, определяемые на условиях достаточной точности аппроксимации экспериментальных кривых; V – скорость движения, м/с; f – частота, Гц.

В РД 32.68-96 для описания разброса оценок спектральных плотностей простран-

ственных возмущений с учетом изменчивости состояния пути применяется выражение

$$\eta(f) = \bar{G}\eta(f)(1 + U_p V_s) \quad (4)$$

где U_p – квантиль, соответствующий вероятности P для нормального закона распределения;

V_s – коэффициент вариации среднего квадратического отклонения эквивалентной неровности.

В зарубежных научных исследованиях для создания неровностей пути и оценки динамических качеств подвижного состава

используются спектральные плотности мощности, рекомендованные в отчете *ERRI B176* [10] и *UIC 518* [11]. Принцип построения таких спектральных плотностей имеет схожий вид для вертикальных неровностей

$$S(\Omega) = \frac{A\Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_r^2)(\Omega^2 + \Omega_c^2)}, \quad (5)$$

где A , Ω , Ω_c , Ω_r – коэффициенты аппроксимации.

Стоит обратить внимание, что в [11] описывается девять классов качества железных дорог, при этом лучшим считается девятый класс, а худшим – первый. Первые пять классов относятся к путям с обычным движением, а классы с шестого по девятый применяются для описания качества участков пути с высокоскоростным движением, от 90 миль в час (145 км/ч) для пассажирских составов и от 80 миль в час (130 км/ч) для грузовых.

Как было отмечено ранее, особенностью работы маневровых локомотивов является тот факт, что скорость движения на путях промышленных предприятий имеет значительные ограничения и при таких низких скоростях наибольший вклад оказывают

стыковые неровности, которые могут достигать предельных значений (рис. 1).

Однако, в результате анализа используемых кинематических возмущений, регламентирующих параметры железнодорожного пути, следует отметить, что в них отсутствует учет стыковых неровностей, которые могут оказывать существенное влияние на динамическую нагруженность несущих конструкций маневровых локомотивов, эксплуатируемых на низких скоростях.

В связи с этим, помимо оценки динамической нагруженности, вызванной регламентированными неровностями, в используемые кинематические возмущения были дополнительно включены стыковые неровности с просадкой 3 и 5 мм. Выбор данных значений обусловлен реальными замерами, выполненными на подъездных путях одного из предприятий железных дорог Республики Узбекистан (рис. 1). Стоит отметить, что указанные параметры неровностей характерны исключительно для промышленных путей, где маневровые локомотивы выполняют основные работы.



Рис. 1. Общий вид стыковой неровности путей промышленных предприятий
Fig. 1. General view of a joint irregularity on industrial railway tracks

Отметим, что основным документом, в котором описываются требования к прочности и динамическим качествам локомотивов являются ГОСТ 34939-2023 и ГОСТ 55513-2013. В данных документах содержится, что для оценки динамических качеств локомотива и выбора упруго-диссипативных характеристик рессорного подвешивания при проектировании используют программные комплексы, позволяющие путем компьютерного моделирования определить значения динамических показателей [12, 13]. Отметим, что в настоящее время для модели-

рования и анализа динамических систем, в том числе железнодорожного подвижного состава положительно зарекомендовал себя отечественный программный комплекс «Универсальный механизм» [14], который позволяет моделировать движение железнодорожных вагонов и локомотивов, учитывая различные факторы, такие как взаимодействие колес и рельсов, динамические нагрузки и колебания. В зарубежных научных исследованиях активно применяются такие программные комплексы *SIMPACK* (Германия), *VAMPIRE* (Великобритания),

GENSYS (Швеция), *MSC Adams/Rail* (США), *Nucars* (США), *VOCO* (Франция) [15]. В связи с доступностью отечественных программных продуктов и возможностью вводить расчетные и измеренные профили неровностей в соответствии с рассмотренными ранее типами неровностей в данном науч-

ном исследовании был применен программный комплекс «Универсальный механизм».

Для исследования динамической нагруженности была использована модель маневрового локомотива ТЭМ2, разработанная в программном комплексе «Универсальный механизм» (рис. 2).

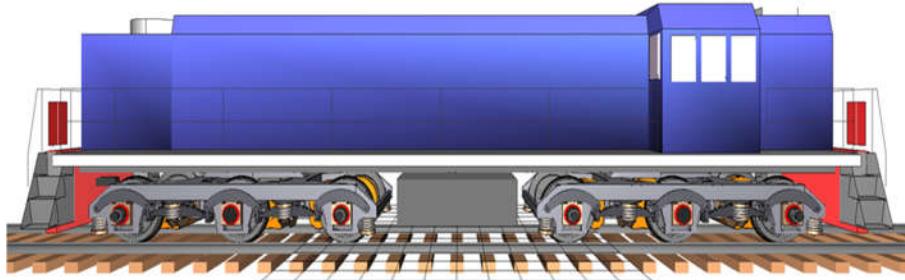


Рис. 2. Общий вид модели маневрового тепловоза ТЭМ2
Fig. 2. General view of the TEM2 shunting locomotive model

Модель рельсового экипажа выполнялась в модуле *UM Loco* (Моделирование динамики рельсовых экипажей) и представлена в виде совокупности твердых тел, связанных между собой шарнирами и силовыми элементами. На рис. 3 представлена структурная схема математической модели ма-

неврового локомотива. Используемая модель локомотива ТЭМ2 представляет собой систему из 71-ого абсолютно твердого тела: кузова, рамы тележки, рессор, буks, балансиров, элементов колёсно-моторного блока и т.д. Общее количество степеней свободы компьютерной модели составило 182.

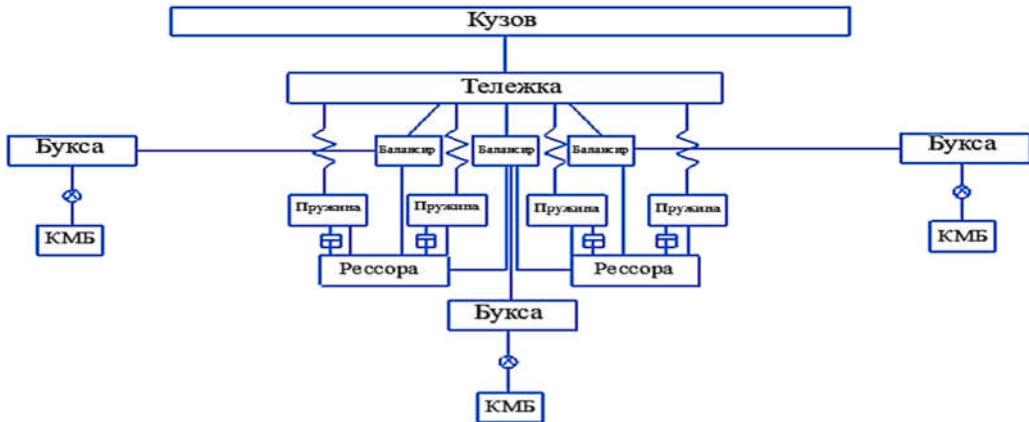


Рис. 3. Структура модели локомотива
Fig. 3. Structure of the locomotive model

Для оценки динамической нагруженности несущих конструкций локомотива используется коэффициент динамики K_d , который описывается отношением максимальной силы, действующей на конструкцию, к статической нагрузке. В данной работе коэффициент динамики определяется по следующей формуле

$$K_d = \frac{F_{\text{дин}} + F_{\text{ст}}}{F_{\text{ст}}} = 1 + \frac{F_{\text{дин}}}{F_{\text{ст}}}, \quad (6)$$

где $F_{\text{ст}}$ – статическая сила, определяемая массой конструкции и силой тяжести, $F_{\text{дин}}$ – динамическая сила, возникающая при движении локомотива по неровному пути.

Принятое в работе выражение (6) учитывает, что коэффициент динамики включает не только динамическую составляющей нагрузку, но и статическую.

Таблица 2

Принятые в структурной схеме обозначения

Table 2

Designations adopted in the structural diagram

Обозначение	Наименование
	Твердые тела
	Жесткое закрепление тел
	Линейный (билинейный) силовой элемент
	Вращательный шарнир
	Биполярный силовой элемент

Для определения коэффициента вертикальной динамики были рассмотрены наиболее нагруженные зоны рамы тележки в

местах опирания на элементы рессорного подвешивания (рис. 4).

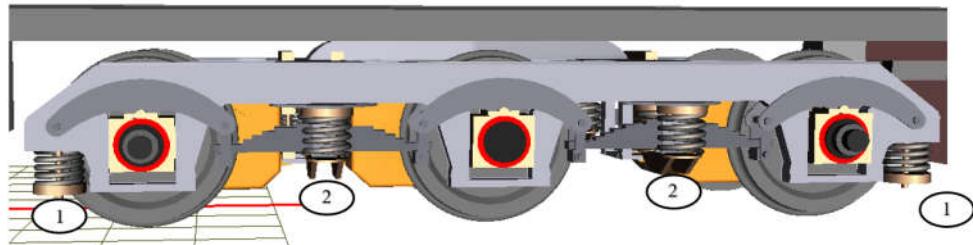


Рис. 4. Общий вид рамы тележки с указанием точек определения коэффициента динамики:
1 – крайние опоры элементов рессорного подвешивания, 2 – средние опоры элементов рессорного подвешивания

Fig. 4. General view of the bogie frame with indication of the points for determining the dynamic coefficient: 1 – the extreme supports of the spring suspension elements, 2 – the middle supports of the spring suspension elements

Результаты

Приведем табличные значения результатов расчетов коэффициента динамики, показывающие влияние различных типов не-

ровностей на динамическую нагруженность несущей конструкции.

Таблица 3

Значения коэффициентов вертикальной динамики, полученных от неровностей РД 32.68-96

Table 3

Values of vertical dynamic coefficients obtained from irregularities according to RD 32.68-96

V, [км/ч]	Без учета стыковых неровностей		С учетом стыковых неровностей (просадка 3 мм)		С учетом стыковых неровностей (просадка 5 мм)	
	K_d крайних опор	K_d средних опор	K_d крайних опор	K_d средних опор	K_d крайних опор	K_d средних опор
5	1,000	1,000	1,052	1,046	1,065	1,061
10	1,000	1,000	1,086	1,063	1,127	1,092
15	1,003	1,004	1,135	1,064	1,206	1,099
20	1,033	1,060	1,176	1,080	1,266	1,127
25	1,057	1,035	1,182	1,072	1,281	1,119
30	1,066	1,040	1,181	1,087	1,223	1,094

Значения коэффициентов вертикальной динамики, полученных от неровностей ПНСТ 511-2020

Таблица 4

Values of vertical dynamic coefficients obtained from irregularities according to PNST 511-2020

Table 4

V, [км/ч]	Без учета стыковых неровностей		С учетом стыковых неровностей (просадка 3 мм)		С учетом стыковых неровностей (просадка 5 мм)	
	K_d крайних опор	K_d средних опор	K_d крайних опор	K_d средних опор	K_d крайних опор	K_d средних опор
5	1,080	1,070	1,086	1,074	1,088	1,075
10	1,087	1,071	1,106	1,082	1,125	1,111
15	1,095	1,081	1,155	1,084	1,251	1,112
20	1,112	1,094	1,179	1,099	1,237	1,141
25	1,103	1,085	1,175	1,101	1,308	1,113
30	1,102	1,081	1,169	1,091	1,206	1,112

Значения коэффициентов вертикальной динамики, полученных от неровностей ERRI B176

Таблица 5

Values of vertical dynamic coefficients obtained from irregularities according to ERRI B176

Table 5

V, [км/ч]	Без учета стыковых неровностей		С учетом стыковых неровностей (просадка 3 мм)		С учетом стыковых неровностей (просадка 5 мм)	
	K_d крайних опор	K_d средних опор	K_d крайних опор	K_d средних опор	K_d крайних опор	K_d средних опор
5	1,012	1,008	1,060	1,052	1,069	1,063
10	1,029	1,026	1,084	1,057	1,126	1,091
15	1,029	1,025	1,135	1,064	1,218	1,097
20	1,035	1,032	1,175	1,065	1,272	1,107
25	1,034	1,031	1,178	1,061	1,276	1,089
30	1,037	1,035	1,162	1,061	1,219	1,069

Значения коэффициентов вертикальной динамики, полученных от неровностей UIC 518

Таблица 6

Values of vertical dynamic coefficients obtained from irregularities according to UIC 518

Table 6

V, [км/ч]	Без учета стыковых неровностей		С учетом стыковых неровностей (просадка 3 мм)		С учетом стыковых неровностей (просадка 5 мм)	
	K_d крайних опор	K_d средних опор	K_d крайних опор	K_d средних опор	K_d крайних опор	K_d средних опор
5	1,061	1,064	1,057	1,058	1,058	1,057
10	1,097	1,096	1,139	1,137	1,189	1,157
15	1,102	1,098	1,188	1,129	1,267	1,153
20	1,111	1,098	1,235	1,128	1,315	1,164
25	1,124	1,102	1,233	1,134	1,350	1,154
30	1,121	1,123	1,178	1,126	1,200	1,132

Выводы и обсуждение

Анализ результатов оценки динамической нагруженности маневровых локомотивов при движении с использованием различных типов неровностей показал, что введение в расчет стыковых неровностей приводит к увеличению коэффициента вертикальной динамики. Стоит подчеркнуть, что данный эффект наиболее выражен при низких скоростях движения.

Рассмотрим значения коэффициента динамики K_d при расчете без учета стыковых неровностей. Данный расчет соответствует условиям движения по пути, описанному стандартными регламентированными неровностями. Так при моделировании движения локомотива по неровностям, описанным в РД 32.68-96, при $V = 30$ км/ч значения K_d для крайних и средних опор без стыковых возмущений составляют 1,066 и 1,040 соответственно. Однако при введении в расчет стыковых неровностей с просадкой 3 мм, значения K_d увеличиваются до 1,181 и 1,087, а при просадке 5 мм – до 1,223 и 1,094.

Рассматривая значения коэффициента динамики, полученные по РД 32.68-96, стоит отметить, что максимальные значения коэффициента динамики получены для скорости $V = 25$ км/ч в случае учета стыковых неровностей с просадкой 5 мм, который достигает 1,281 для крайних опор и 1,119 для средних опор. Данный факт подтверждает, что в диапазоне низких скоростей движения, характерных для маневровых локомотивов, стыковые неровности оказывают наибольшее влияние на динамическую нагруженность несущей конструкции.

Сравнение результатов для различных нормативных подходов к моделированию неровностей показало схожие результаты, при этом наибольшее значение коэффициента динамики получено в случае использования неровностей *UIC 518* и стыковых неровностей с просадкой 5 мм, где при $V = 25$ км/ч K_d достигает 1,35, тогда как при моделировании по РД, ПНСТ и *ERRI B176* максимальное значение K_d составило 1,281, 1,31 и 1,276 соответственно.

Полученные данные подтверждают, что учет стыковых неровностей является важным при оценке динамической нагру-

женности несущих конструкций маневровых локомотивов. Иными словами, с целью избежания недостаточно точной оценки нагруженности несущих конструкций маневровых локомотивов необходимо использование иных видов кинематических возмущений.

На основе проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Стыковые неровности оказывают существенное влияние на коэффициент вертикальной динамики маневровых локомотивов. Введение в расчет стыковых неровностей приводит к увеличению K_d при малых скоростях движения. Максимальные значения коэффициента динамики получены при $V = 25$ км/ч, где K_d достигает 1,35 для крайних опор при стыковой просадке 5 мм.

2. Воздействие стыковых неровностей наиболее выражено в диапазоне низких скоростей. Данный эффект особенно критичен для маневровых локомотивов, эксплуатируемых на промышленных путях, где скорости движения находятся в диапазоне 5...30 км/ч.

3. Сравнение нормативных неровностей показало, что различные типы неровностей дают различные значения коэффициентов вертикальной динамики, значительно отличающихся между собой. Например, при $V = 25$ км/ч K_d достигает 1,35, тогда как при моделировании по РД, ПНСТ и *UIC 518* максимальное значение K_d составило 1,281, 1,31 и 1,276. В связи с этим можно утверждать, что для оценок динамической нагруженности несущих конструкций маневровых локомотивов следует использовать скорректированные или специально разработанные неровности. Отметим, что в работе [16] подчеркивается необходимость разработки единого ГОСТ, который будет регламентировать параметры неровностей железнодорожного пути при моделировании динамики. Создание такого ГОСТ позволит унифицировать методы расчета динамики подвижного состава и обеспечить сопоставимость результатов расчетов.

4. В дальнейшем полученные результаты могут быть использованы для оценки остаточного ресурса несущих конструкций маневровых локомотивов.

Таким образом, полученные результаты будут полезны для совершенствования нормативных требования к оценкам динамических характеристик маневровых локомотивов и разработки рекомендаций по учету специфики состояния железнодорожных путей промышленных предприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пеканов, А. А. Состояние парка локомотивов промышленных предприятий: причины и следствия / А. А. Пеканов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2014. № 3(27). – С. 35-39.
2. Брагин, А. М. Повышение уровня безопасности железнодорожного транспорта необщего пользования / А. М. Брагин // Постулат. 2018. № 2-1(28). С. 26.
3. Дудкин, Е. П. Проблемы устройства и содержания железнодорожных путей необщего пользования / Е. П. Дудкин, В. М. Рыбачок // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 2(15). С. 16-17.
4. Оценка долговечности и остаточного ресурса рам тележек локомотивов / Б. Б. Бунин, Э. С. Оганян, Т. М. Пономарева, В. Г. Шевченко // Тяжелое машиностроение. 2007. № 11. С. 31-33. – EDN IBZZIR.
5. Ушkalов, В. Ф. Расчетные возмущения для оценки динамических качеств грузовых вагонов / В. Ф. Ушkalов, Л. Г. Лапина, И. А. Mashchenko // Наука та прогрес транспорту. 2013. № 4(46). С. 135-144.
6. Акишин, А. А. Генерация многомерного случайного процесса возмущений в задачах динамики подвижного состава железных дорог / А. А. Акишин, А. Н. Савосъкин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 2-3(217-222). С. 71-78. – DOI 10.5862/JCSTCS.217-222.6.
7. Григорьев, П. С. Прогнозирование остаточного ресурса рам промышленных тепловозов : специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Григорьев Павел Сергеевич. Москва, 2016. 22 с. – EDN ZPZGAD.
8. РД 32.68-96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследовании и проектировании пассажирских и грузовых вагонов: Руководящий документ. Введен 1997-01-01. М.: ВНИИЖТ, 1996. 17 с.
9. ПНСТ 511-2020. Вагоны грузовые. Расчетные неровности железнодорожного пути для оценки показателей динамических качеств грузовых вагонов расчетными методами. Москва : Стандартинформ, 2021. 24 с.
10. ERRI B176/DT 290: B176/3 Benchmark Problem, Results and Assessment. Technical report, European Rail Research Institute, 1993.
11. Code UIC 518: Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour: safety, track fatigue, ride quality. 2005. p.129
12. ГОСТ 34939-2023. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. Введен в действие с 01.08.2024. М.: Стандартинформ, 2023. 45 с.
13. ГОСТ 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. Введен в действие с 26.08.2013. М.: Стандартинформ, 2013. 42 с.
14. Погорелов, Д. Ю. Компьютерное моделирование динамики технических систем с использованием программного комплекса "Универсальный механизм" / Д. Ю. Погорелов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. № 4(10). С. 27-34.
15. Анализ программных комплексов для исследования динамических характеристик железнодорожных экипажей / Ж. С. Мусаев, А. Б. Шимбулатова, М. Д. Туркебаев, Л. С. Серикбаева // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2008. № 6(55). С. 59-65.
16. Богданович А. А., Сайдова А. В. Оценка влияния неровностей и модели рельсового пути на динамические качества грузового вагона //Бюллетень результатов научных исследований. 2024. №. 2. С. 29-41.

REFERENCES

1. Pekanov AA. The condition of the locomotive fleet of industrial enterprises: causes and consequences. Railway Equipment Journal. 2014;3(27):35-39.
2. Bragin AM. Improving the safety of non-public railway transport. Postulate. 2018;2-1(28):26.
3. Dudkin EP, Rybachok VM. Problems of construction and maintenance of non-public railway tracks. Transport of the Russian Federation. 2008;2(15):16-17.
4. Bunin BB, Ohanyan ES, Ponomareva TM, Shevchenko VG. Evaluation of the durability and residual re-
- source of locomotive bogie frames. Tyazheloye Mashinostroyeniye. 2007;11:31-33.
5. Ushkalov VF, Lapina LG, Mashchenko IA. Computational perturbations for assessing the dynamic qualities of freight cars. Science and Transport Progress. 2013;4(46):135-144.
6. Akishin AA, Savoskin AN. Generation of a multidimensional random process of perturbations in problems of dynamics of railway rolling stock. Computing, Telecommunication and Control. 2015;2-3(217-222):71-78. DOI 10.5862/JCSTCS.217-222.6.

7. Grigoriev PS. Forecasting the residual life of frames of industrial diesel locomotives [abstract of dissertation]. [Moscow (RF)]; 2016.
8. RD 32.68-96. Estimated railway track irregularities for use in the research and design of passenger and freight cars: guidance document. Moscow: VNIIZHT; 1996.
9. PNST 511-2020. Freight cars. Design irregularities of the railway track for use in dynamic qualities estimation of freight. Moscow: Standartinform; 2021.
10. ERRI B176/DT 290: B176/3 Benchmark Problem, Results and Assessment. Technical report. European Rail Research Institute; 1993.
11. Code UIC 518: Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour: safety, track fatigue, ride quality. 2005.
12. GOST 34939-2023. Locomotives. Requirements for bearing structure strength and dynamic properties. Moscow: Standartinform; 2023.
13. GOST 55513-2013. Locomotives. Requirements for strength and dynamic properties. Moscow: Standartinform; 2013.
14. Pogorelov DYu. Computer modeling of dynamics of technical systems using *Universal Mechanism* software package. Vestnik Komp'iuternykh i Informatsionnykh Tekhnologii (Herald of Computer and Information Technologies). 2005;4(10):27-34.
15. Musaev ZhS, Shimbulatova AB, Turkebaev MD, Serikbaeva LS. Analysis of software systems for the study of dynamic characteristics of railway carriages. Bulletin of KazATC. 2008;6(55):59-65.
16. Bogdanovich AA, Saidova AV. Assessment of the influence of irregularities and the model of the rail track on the dynamic qualities of a freight car. Bulletin of Scientific Research Results. 2024;2:29-41.

Информация об авторах:

Григорьев Павел Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (МИИТ), Scopus Author ID: 57966694500; РИНЦ SPIN-код: 2014-9531; РИНЦ Author ID: 841994, тел. +7-905-549-15-51.

Grigoriev Pavel Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Trains and Locomotives at Russian University of Transport (MIIT), Scopus Author ID: 57966694500; RSCI SPIN code: 2014-9531; RSCI Author ID: 841994, phone: +7-905-549-15-51.

Кодиров Нозимжон Солиевич – аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (МИИТ), РИНЦ SPIN-код: 2365-4338; РИНЦ Author ID: 1283773.

Kodirov Nozimjon Solievich is Postgraduate student of the Department of Electric Trains and Locomotives at Russian University of Transport (MIIT), RSCI SPIN code: 2365-4338; RSCI Author ID: 1283773.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 07.04.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 28.07.2025. Рецензент – Волохов Г.М., доктор технических наук, главный научный эксперт динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры Акционерного общества «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 07.04.2025; approved after review on 24.06.2025; accepted for publication on 28.07.2025. The reviewer is Volokhov G.M., Doctor of Technical Sciences, Chief scientific expert of Rolling Stock and Infrastructure Dynamics and Strength of "Research and Development and Technological Institute of Rolling Stock", member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.