

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.4.027.4

Разработка и верификация пространственной динамической модели рессорного подвешивания маневрового локомотива ТЭМ2

П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров

Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Григорьев П. С., Кодиров Н. С. Разработка и верификация пространственной динамической модели рессорного подвешивания маневрового локомотива ТЭМ2 // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 7–19. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-7-19

Аннотация

Цель: Исследование посвящено построению и численной верификации пространственной модели рессорного подвешивания маневрового локомотива ТЭМ2, реализованной в программном комплексе «Универсальный механизм». На фоне износа подвижного состава, эксплуатируемого сверх нормативного срока службы, возрастает значимость точных инженерных методов оценки динамической нагруженности. **Методы:** В работе представлено моделирование взаимодействия тележки и кузова локомотива при прохождении искусственно сгенерированных неровностей пути, сопровождаемое сравнительным анализом с экспериментальными данными. **Результаты:** Оценка динамических параметров, таких как деформации концевых пружин, коэффициенты вертикальной динамики и рамные силы, продемонстрировала отклонения, не превышающие 15 %, что подтверждает адекватность разработанной модели. Отмечено, что наиболее точные совпадения зафиксированы в диапазоне скоростей 60–80 км/ч. **Практическая значимость:** Результаты могут быть использованы как основа при дальнейшем расчете остаточного ресурса, а также при уточнении методик для оценок динамических характеристик.

Ключевые слова: Маневровый локомотив ТЭМ2, пространственная динамическая модель, рессорное подвешивание, коэффициент вертикальной динамики, рамные силы, «Универсальный механизм», моделирование экипажной части, демпфирующие характеристики, численная верификация.

Введение

Маневровые локомотивы играют ключевую роль в обеспечении бесперебойной работы сортировочных станций и промышленных предприятий, формируя основу маневровых операций и внутривозвратной логистики [1]. В транспортной системе Республики Узбекистан значительная доля парка тепловозов, включая серию ТЭМ2, продолжает эксплуатироваться за пределами нормативного срока службы, что приводит к повышенной частоте отказов и росту затрат на техническое обслуживание [2]. Под действием неравномерных нагрузок, вызванных неровностями пути, геометрическими отклонениями рельсовой

колеи и особенностями эксплуатационных режимов, в элементах несущей структуры возникают напряжения, способствующие развитию усталостных повреждений [3].

При отсутствии должных диагностических инструментов и строгой количественной оценки остаточного ресурса прогнозирование срока службы становится неточным. В связи с этим возрастает потребность в создании пространственных моделей, способных учитывать взаимодействие многотелых компонентов экипажа и воспроизводить трехмерную кинематику системы с учетом ее демпфирующих и инерционных свойств [4–9]. Такие модели позволяют оценить влияние вертикальных, поперечных и продольных нагрузок на состояние несущих конструктивных узлов. Однако, как показывает анализ литературы, до настоящего времени отсутствуют верифицированные трехмерные модели, адаптированные под условия работы маневровых локомотивов. Это ограничивает как точность инженерных расчетов, так и возможность адаптации существующих нормативов к реальным эксплуатационным условиям.

Интересно, что программные комплексы, применяемые для целей много-тельного моделирования, включают в себя как зарубежные продукты (SIMPACK, ADAMS/Rail), так и отечественные решения, среди которых особое место занимает «Универсальный механизм» (УМ). Последний демонстрирует высокую степень приспособленности к задачам, связанным с анализом динамики подвижного состава в условиях эксплуатации на железных дорогах. Адаптивная параметризация, поддержка метода подсистем и возможность включения контактных взаимодействий делают УМ эффективным инструментом для моделирования сложных механических систем [10]. Таким образом, ограниченное число работ, описывающих пространственное моделирование маневровых локомотивов с последующей численной верификацией, определяет актуальность и практическую значимость настоящего исследования.

Целью настоящей работы является построение и численная верификация пространственной динамической модели маневрового локомотива ТЭМ2 на основе программного комплекса «Универсальный механизм» с последующим анализом его динамических характеристик в условиях реальных эксплуатационных воздействий.

Для реализации цели были поставлены следующие задачи:

- построить параметризованную модель экипажа ТЭМ2 с учетом жесткостно-демпфирующих характеристик и трения;
- выполнить численное решение уравнений движения, полученных из построенной модели;
- выполнить верификацию модели по данным деформаций упругих элементов, коэффициента динамики и рамных сил;
- оценить точность модели и возможность ее дальнейшего применения.

Методы и материалы

Объектом исследования выбран маневровый тепловоз ТЭМ2, широко эксплуатируемый на сети железных дорог Республики Узбекистан. Одним из ключевых параметров, отражающих динамическую нагруженность рессорного подвешивания, выступает амплитуда деформации пружины, чувствительная к изменению коэффициентов трения и особенностям контактных взаимодействий экипажных элементов. Следует отметить, что данный параметр обладает высокой корреляцией с величиной передаваемых вертикальных и поперечных нагрузок.

В связи с этим для численного моделирования динамики системы использован программный комплекс «Универсальный механизм» (УМ) [11, 12], обладающий развитым инструментарием построения пространственных моделей железнодорожного подвижного состава. В качестве основной среды реализации принят модуль UM Loco, предназначенный для расчета движения экипажа при воздействии переменных во времени нагрузок. Данный модуль позволяет создавать параметризованные многостепенные модели, в которых инерционные, геометрические и визуализированные элементы задаются в виде идентификаторов и выражений, связующих между собой реальные характеристики узлов конструкции локомотива.

При выполнении моделирования учитывались силовые элементы, описываемые параметрами жесткости, демпфирования и трения, подбираемыми с опорой на реальные эксплуатационные режимы. Особое внимание уделялось корректному описанию граничных условий взаимодействия между кузовом, тележками, буксами и колесно-моторными блоками.

Разработка конструкции модели в среде УМ основана на логике соединения твердых или упругих тел посредством шарниров, ограничителей и силовых элементов. Для повышения структурной прозрачности и упрощения построения модели был реализован метод подсистем, при котором каждый крупный компонент (например, кузов, тележка, колесная пара) моделируется отдельно, а затем объединяется в единую динамическую схему через силовые и кинематические связи. Эти структурные подсистемы впоследствии интегрируются в единую систему через жесткие и податливые связи. Рис. 1 демонстрирует схему взаимодействия всех подсистем в компьютерной модели маневрового локомотива ТЭМ2. В табл. 1 приведены основные физические характеристики модели локомотива ТЭМ2.

Модель тележки локомотива ТЭМ2 была построена с точным воспроизведением геометрии и кинематических зависимостей, присущих реальной конструкции рессорного подвешивания. Для повышения точности сопоставления с результатами экспериментальных испытаний, представленными в источнике [13], была сформирована отдельная подсистема, отражающая поведение рамы тележки. При этом использована унифицированная тележка, идентичная исследуемому объекту по конструкции подвески и структуре контактных связей.

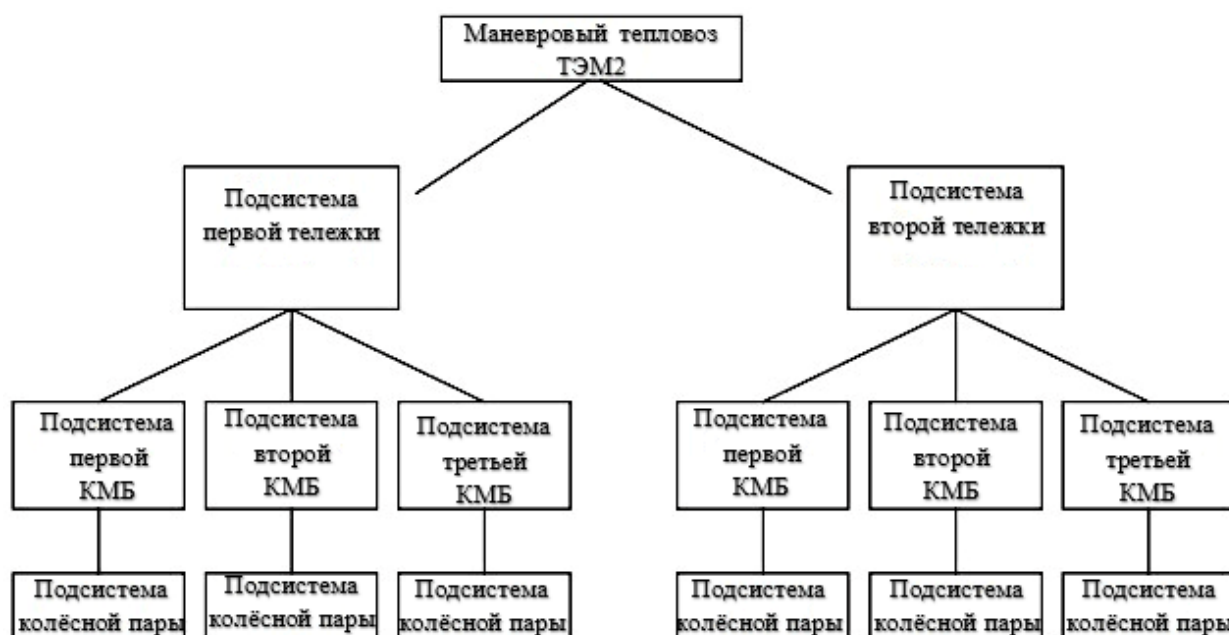


Рис. 1. Структура подсистем в программном комплексе «Универсальный механизм»

ТАБЛИЦА 1. Массовые и инерционные параметры модели маневрового локомотива ТЭМ2

Параметр	Значение	Единица измерения
Масса кузова	72,864	т
Масса тележки	6,259	т
Масса колесной пары	1,345	т
Масса тягового электродвигателя (ТЭД)	3100	кг
Масса рессоры	123	кг
Момент инерции кузова вокруг оси Z	1 050 000	кг м ²
Момент инерции кузова вокруг оси X	73 000	кг м ²
Момент инерции кузова вокруг оси Y	1 100 000	кг м ²

После завершения этапа геометрического и физического построения вся механическая модель локомотива представлена в виде системы из 71 абсолютно твердого тела, включая кузов, рамы тележек, элементы подвески, буксы, балансиры, колесные пары, тяговые электродвигатели и сопряженные с ними подвески (рис. 2). В результате такой дискретизации удалось получить динамическую модель с 182 степенями свободы, отражающими движение всех ключевых компонентов конструкции в пространстве.

В построенной в программной среде «Универсальный механизм» модели тележки маневрового тепловоза ТЭМ2 силовое поведение элементов рессорного подвешивания моделировалось на основе линейных соотношений классической теории упругости. Такой подход позволил сформировать функциональную модель взаимодействия, адекватно отражающую поведение системы в пределах допускаемых эксплуатацией деформаций.

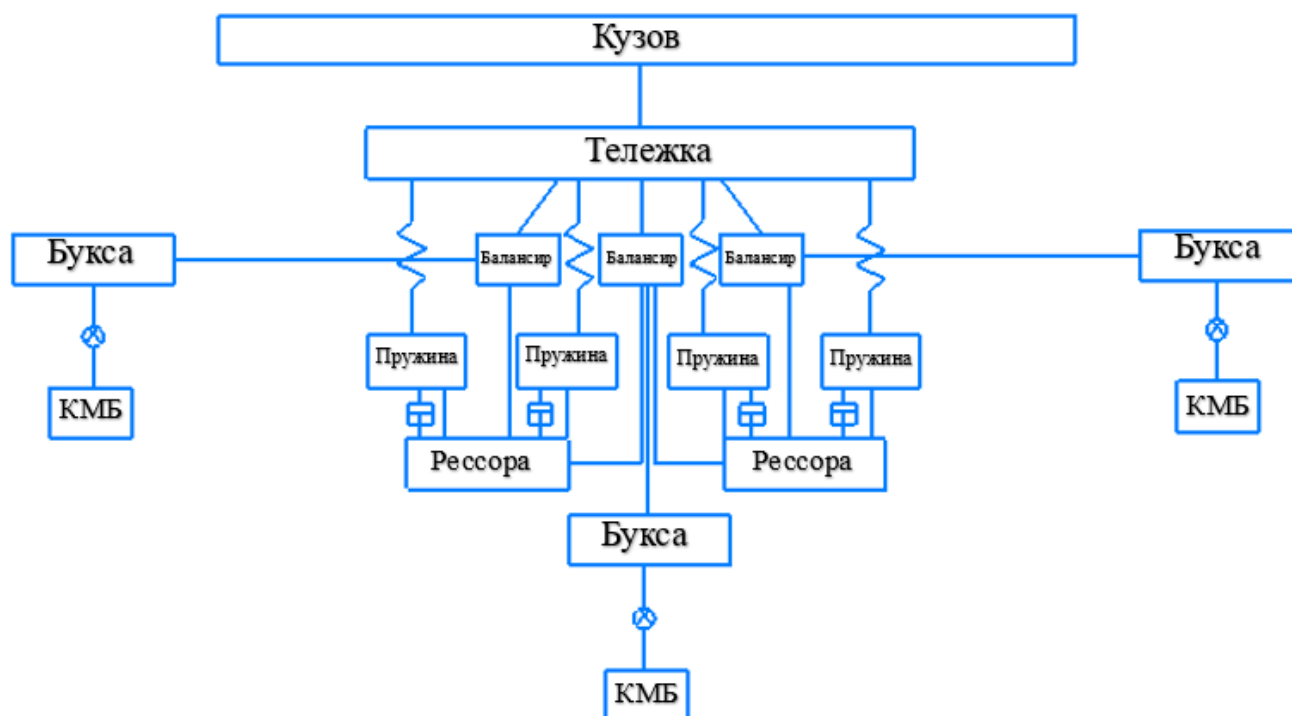


Рис. 2. Структура пространственной механической модели локомотива ТЭМ2

ТАБЛИЦА 2. Условные обозначения элементов в структуре модели локомотива ТЭМ2

Обозначение	Описание элемента
	абсолютно твердое тело
	жесткое закрепление тел
	линейный (билинейный) силовой элемент
	вращательный шарнир
	биполярный силовой элемент

Следует отметить, что полученная линейная аппроксимация обеспечивает воспроизведение упругой характеристики с достаточной точностью, по крайней мере в пределах первичной рабочей области. Это критически важно для корректного моделирования динамических процессов, особенно в условиях циклических нагрузок и переменной кинематики при взаимодействии тележки с кузовом.

При расчетах использовано выражение для силы:

$$f = F_0 - c(x - x_0) - dv + Q \sin(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

где F_0 — постоянная составляющая силы;
 c, d — коэффициенты жесткости и диссипации;
 x_0 — координата равновесного положения;
 Q, ω, α — амплитуда, частота и начальная фаза гармонического возбуждения.

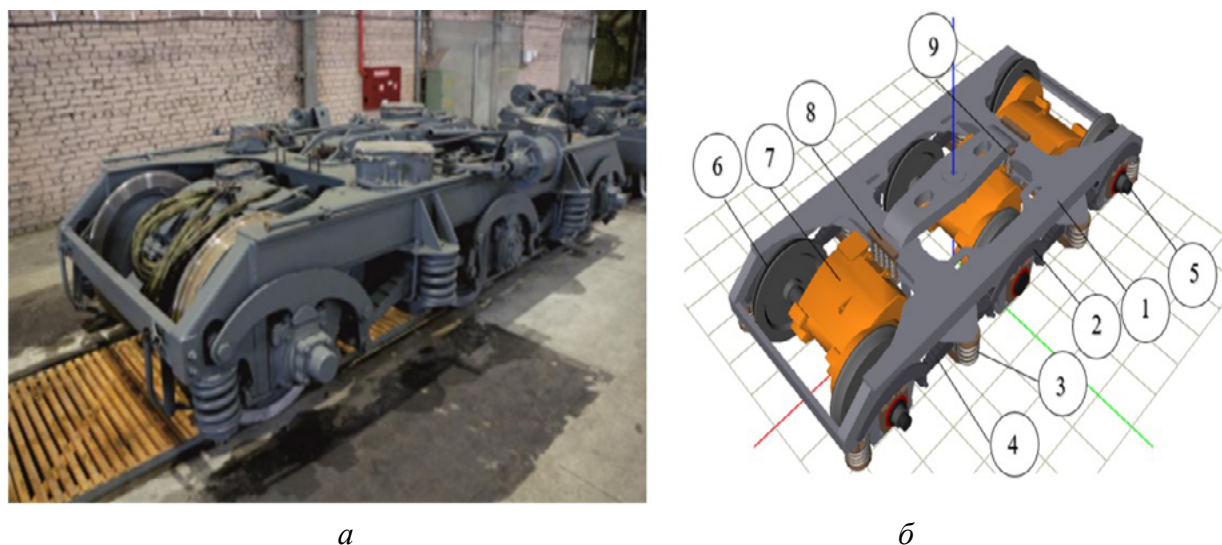


Рис. 3. *а* — унифицированная тележка маневрового локомотива;
б — построенная модель тележки в среде «Универсальный механизм»:
 1 — рама тележки; 2 — балансир; 3 — цилиндрическая пружина; 4 — лист
 рессоры; 5 — букса; 6 — колесная пара; 7 — тяговый электродвигатель;
 8 — подвеска ТЭД; 9 — вспомогательная пружина



Рис. 4. Схема соединения элементов рессорного подвешивания
 в программной среде «Универсальный механизм»

Конструктивно рессорное подвешивание ТЭМ2 реализовано в виде комбинированной схемы, в которой пружина с жесткостью C_1 соединена последовательно с параллельной ветвью, включающей вторую пружину C_2 и фрикционный элемент, сформированный набором листов рессоры. Иллюстративное отображение данной структуры представлено на рис. 4.

Значение деформации Δx определяется из условия равенства силы в пружине C_1 , в параллельном соединении пружины C_2 и фрикционного элемента:

$$f = f_1 = f_2 + F_{fr}. \quad (2)$$

Из данного выражения выведена формула для определения результирующей деформации системы:

$$\Delta x = x_1 - x_2; \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{c_1 \Delta x}{c_1 + c_2(1 \pm \mu)}, \quad (4)$$

где x_1, x_2 — деформации пружин,

C_1 и C_2 — жесткости пружин,

f — усилия в пружинах,

μ — коэффициент трения скольжения,

F_{fr} — сила трения, зависящая от режима контакта (скольжение или сцепление).

Переход от сцепления к скольжению в среде Universal Mechanism реализуется в соответствии с законом Кулона при выполнении следующего условия:

$$|F_{fr}| = |f_1 - c_2 x_2| > \mu_0 |c_2 x_2|. \quad (5)$$

где μ_0 — коэффициент трения покоя [11, 13].

Таким образом, данный подход позволяет точнее отразить реальные физические процессы, происходящие в подвеске при различных режимах нагружения, и обеспечивает адекватное описание демпфирующих свойств системы.

В работе использован метод символьного синтеза уравнений динамики, реализованный в программной среде Universal Mechanism. Данный подход позволил существенно сократить вычислительные затраты благодаря оптимизации символьных выражений. Важным преимуществом является поддержка как нелинейных, так и линеаризованных форм уравнений, что значительно расширяет возможности моделирования.

Для получения уравнений движения применен подход Ньютона — Эйлера. Численное интегрирование осуществлялось с использованием следующих методов:

- метод Адамса — Башфорта — Моултона;
- метод Рунге — Кутты;
- формулы обратного дифференцирования;
- схема Гира.

ТАБЛИЦА 3. Упругие и демпфирующие характеристики элементов модели ТЭМ2

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Вертикальная жесткость основной пружины	c_1	990	кН/м
Вертикальная жесткость вспомогательной пружины	c_2	990	кН/м
Жесткость рессоры	—	1880	кН/м
Коэффициент трения скольжения	μ	0,032	—
Коэффициент трения покоя	μ_0	0,0384	—

При моделировании жестких задач, включая контактные взаимодействия, был применен метод Парка с автоматическим построением матриц Якоби. Такой подход обеспечил высокую устойчивость вычислений при резких динамических переходах, что особенно важно при решении сложных инженерных задач.

Результаты

В качестве экспериментальной базы для верификации модели использованы данные динамических испытаний локомотива 2ТЭ10Л, приведенные в техническом отчете [10]. Несмотря на различие в серии и назначении локомотивов, необходимо отметить, что конструкция тележек 2ТЭ10Л и ТЭМ2 идентична по геометрии рессорного подвешивания, компоновке основных узлов и типу упругих элементов. Это обеспечивает допустимость использования результатов испытаний 2ТЭ10Л для ориентировочной верификации модели, разработанной для ТЭМ2, особенно в части оценки амплитудных деформаций, коэффициента вертикальной динамики и рамных сил. Ниже приведены графические (рис. 5–7) и табличные материалы (табл. 4–6), иллюстрирующие соответствие расчетных и экспериментальных данных.

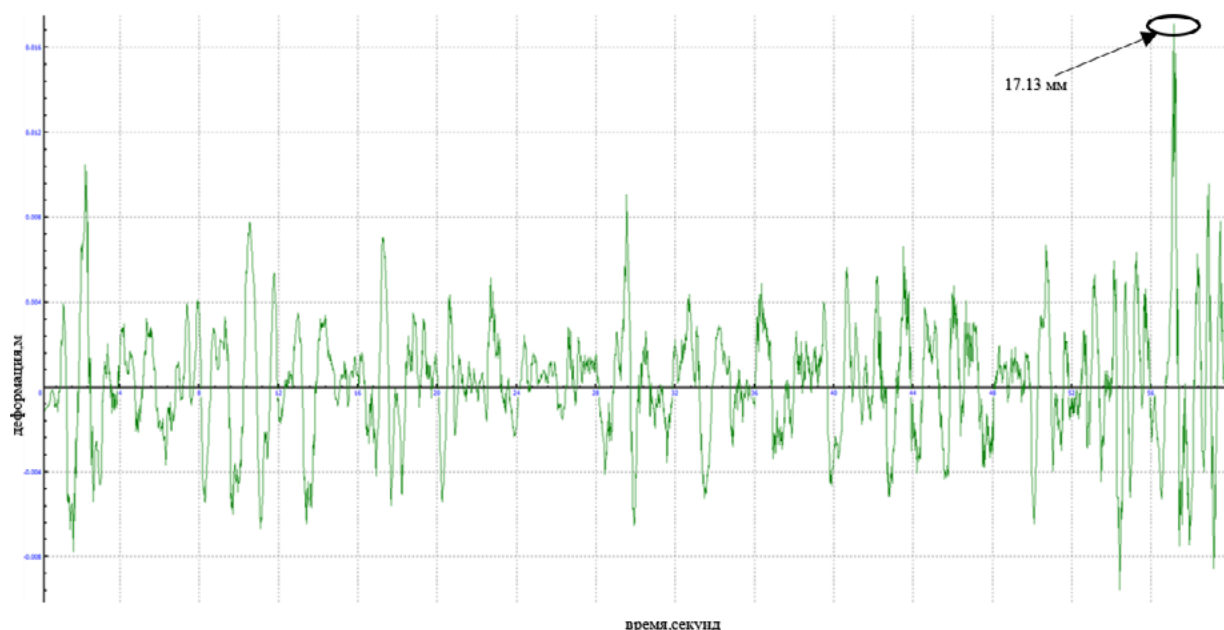


Рис. 5. Деформации концевых пружин при прохождении расчетной неровности пути по ПНСТ 511—2020 (60 км/ч)

ТАБЛИЦА 4. Сравнение деформаций пружин по эксперименту и численному моделированию

Скорость, км/ч	Эксперимент [8], мм	Моделирование (УМ), мм
60	6–18	17
70	7–16	19
80	10–21	20

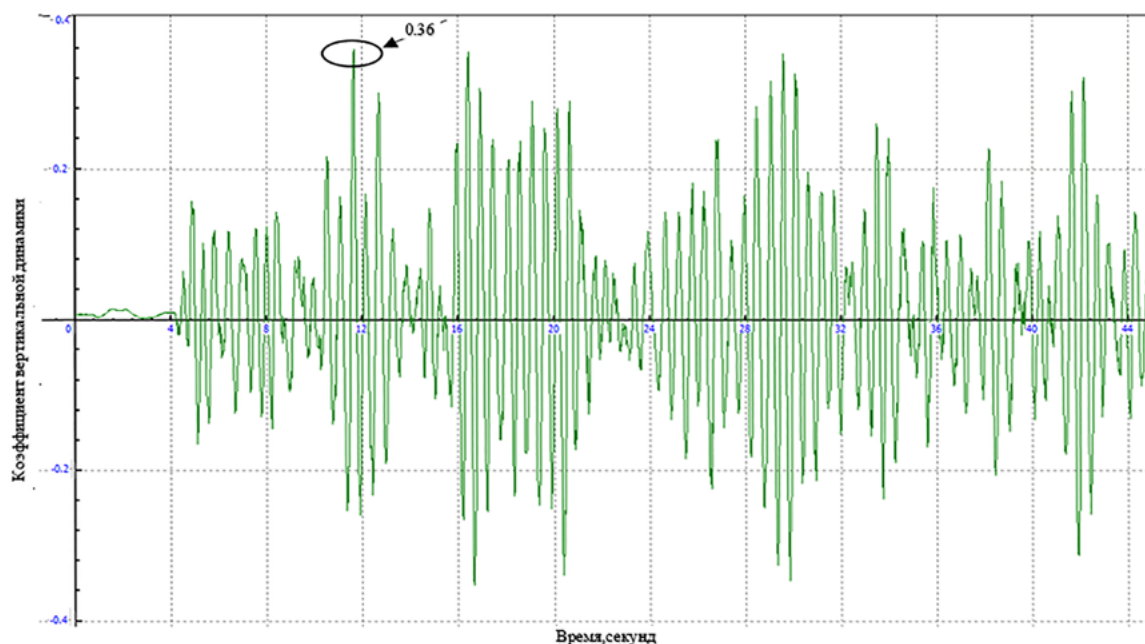


Рис. 6. Коэффициент вертикальной динамики при движении по расчетной неровности по ПНСТ 511—2020 (60 км/ч)

ТАБЛИЦА 5. Сравнение коэффициента вертикальной динамики

Скорость, км/ч	Эксперимент [8]	Моделирование (УМ)
60	0,35	0,36
70	0,42	0,39
80	0,49	0,50

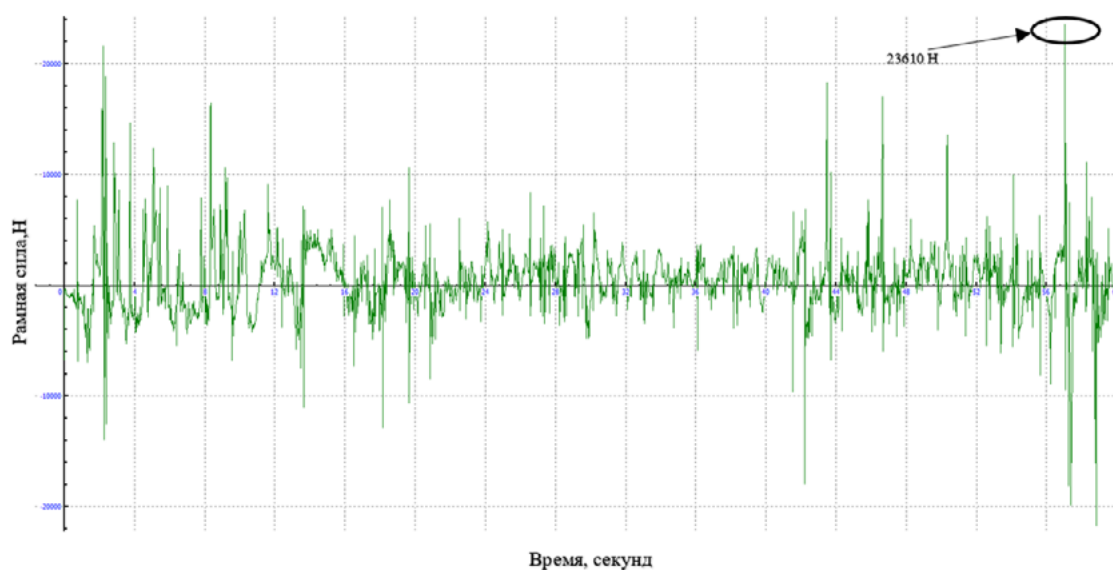


Рис. 7. Рамные силы при прохождении расчетной неровности пути по ПНСТ 511—2020 (80 км/ч)

ТАБЛИЦА 6. Сравнение расчетных и экспериментальных значений рамных сил

Скорость, км/ч	Эксперимент [8], кН	Моделирование (УМ), кН
60	18,635	19,215
80	22,896	23,160

Выводы и обсуждение

Проведенное моделирование динамики рессорного подвешивания маневрового локомотива ТЭМ2 в программной среде «Универсальный механизм» показало высокую степень соответствия с результатами экспериментальных испытаний, описанных в [13]. Сравнительный анализ подтвердил корректность используемой модели и обоснованность принятых в ходе построения допущений.

Во-первых, по деформациям концевых пружин при различных скоростях движения (60, 70 и 80 км/ч) расчетные значения составили соответственно 17, 19 и 20 мм, в то время как натурные измерения варьировались в пределах 6–18, 7–16 и 10–21 мм. Среднее отклонение от экспериментальных данных составило порядка 15 %, что укладывается в диапазон допустимой инженерной погрешности и демонстрирует надежность модели при воспроизведении нелинейных деформаций элементов подвески.

Во-вторых, сравнение коэффициентов вертикальной динамики, полученных при численном моделировании и в ходе натурных испытаний, также подтверждает достоверность модели. При скорости 60 км/ч значение составило 0,36 в модели против 0,35 в эксперименте; при 70 км/ч — 0,39 против 0,42; при 80 км/ч — 0,50 против 0,49. Среднее отклонение составило 3,3 %, при этом наибольшее расхождение (7,1 %) зафиксировано при скорости 70 км/ч. Тем не менее даже это значение не выходит за пределы допустимой точности для расчетов динамики подвижного состава.

В-третьих, при анализе рамных сил также наблюдается высокая степень совпадения. Для скоростей 60 и 80 км/ч расчетные значения составили 19,215 кН и 23,160 кН, тогда как экспериментальные составили 18,635 кН и 22,896 кН соответственно. Среднее отклонение по этим параметрам составило 2,09 %.

Таким образом, расхождения между результатами численного моделирования и натурных испытаний не превышают 15 %, а в большинстве случаев остаются в пределах 3–5 %. Это подтверждает адекватность разработанной пространственной модели и ее пригодность для инженерных расчетов динамических характеристик локомотивов в условиях сложных путевых возмущений. Модель может быть использована как основа для уточнения нормативных требований, оценки остаточного ресурса, а также при разработке методик расчета динамических нагрузок с учетом расчетных неровностей пути.

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. Хамидов О. Р. Оценка остаточного ресурса главных рам маневровых тепловозов / О. Р. Хамидов, А. М. Юсуфов, Н. С. Кодиров, Ш. Ф. Жамилов и др. // *Universum: технические науки*. — 2022. — № 2-3(95).
3. Оганьян Э. С. Критерии несущей способности конструкций локомотивов в экстремальных условиях нагружения: дис. ... д-ра техн. наук / Э. С. Оганьян. — Коломна, 2004. — 389 с. — URL: <https://www.dissercat.com> (дата обращения: 09.03.2025).
4. Григорьев П. С. Определение динамической нагруженности несущего узла маневрового локомотива / П. С. Григорьев // *Транспорт Российской Федерации*. — 2015. — № 3(58). — С. 44–46.
5. Тарасов А. Э. Отладка и проверка пространственных динамических моделей локомотивов в Simpack Rail на верхнем уровне / А. Э. Тарасов // *Инновационный транспорт*. — 2018. — № 1(27). — С. 67–75. — DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-249-263.
6. Тарасов А. Э. Моделирование движения рельсового экипажа в кривой в Simpack Rail / А. Э. Тарасов, Е. В. Сердобинцев // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 249–263. — DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-249-263.
7. Çati Yu. Development of a New Vertical Dynamic Model of a Rail Vehicle for the Analysis of Ride Comfort / Yu. Çati, M. Düzgün, F. E. Kracht // *Applied Sciences (Switzerland)*. — 2024. — Vol. 14. — Iss. 9. — P. 3848. — DOI: 10.3390/app14093848.
8. Bruni S. State-of-the-art and challenges of railway and road vehicle dynamics with multibody dynamics approaches / S. Bruni, J. P. Meijaard, A. L. Schwab, G. Rill // *Multibody System Dynamics*. — 2020. — Vol. 49. — Iss. 1. — DOI: 10.1007/s11044-020-09735-z.
9. Кожухов И. А. Разработка динамической модели маневрового локомотива / И. А. Кожухов // *Вестник науки*. — 2023. — Т. 3. — № 7(64). — С. 305–309.
10. Погорелов Д. Ю. Программный комплекс «Универсальный механизм» для моделирования динамики железнодорожного транспорта / Д. Ю. Погорелов, В. А. Симонов, В. В. Яковлев // *Журнал компьютерных и системных наук*. — 2015. — Т. 54. — № 6. — С. 912–920. — URL: <https://www.springer.com> (дата обращения: 04.04.2025).
11. Универсальный механизм: Руководство пользователя УМ. Моделирование динамики железнодорожных экипажей. — URL: <http://www.universalmechanism.com> (дата обращения: 10.05.2024).
12. Сайт «Универсальный механизм». Руководство пользователя УМ. Руководство пользователя УМ. Механическая система как объект моделирования. — URL: <http://www.universalmechanism.com> (дата обращения: 10.05.2024).
13. Кокорев А. И. Исследование влияния увеличенной осевой нагрузки до 23 т на динамические, прочностные и тягово-эксплуатационные характеристики. Динамические и прочностные испытания тепловоза 2ТЭ10Л с нагрузкой от оси на рельсы 23 тонны. Технический отчет по научно-исследовательской работе: № И-28-74. отчет о НИР И-01-94 / А. И. Кокорев, Б. Б. Бунин, В. А. Пархонин. ВНИТИ. — Коломна, 1974. — 218 с.

Дата поступления: 14.06.2025

Решение о публикации: 11.07.2025

Контактная информация:

ГРИГОРЬЕВ Павел Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; grigorev.p@gmail.com

КОДИРОВ Нозимжон Солиевич — аспирант; nazimzhank@bk.ru

Development and Validation of a Spring Suspension Spatial Dynamic Model for the TEM2 Shunting Locomotive

P. S. Grigorev, N. S. Kodirov

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obratzsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Grigorev P. S., Kodirov N. S. Development and Validation of a Spring Suspension Spatial Dynamic Model for the TEM2 Shunting Locomotive. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 7–19. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-7-19

Summary

Purpose: The research focuses on the development and numerical validation of a spatial model for the spring suspension in the TEM2 shunting locomotive, utilising the Universal Mechanism software environment. As the rolling stock operated beyond its standard service lifespan experiences wear and tear, the necessity for precise engineering methodologies to evaluate dynamic loads becomes increasingly critical. **Methods:** The study includes a simulation of the interaction between the bogie and the locomotive body while traversing artificially created track irregularities, as well as a comparative analysis with experimental data. **Results:** The results reveal that the assessment of dynamic parameters, including end spring deformations, vertical dynamics coefficients and frame forces, has demonstrated deviations not exceeding 15%, thus affirming the model's validity. It is noteworthy that the most accurate correlations have been recorded in the speed range of 60–80 km/h. **Practical significance:** The results can be used as a basis for further calculation of the residual service life, and for refining methods for assessing dynamic characteristics.

Keywords: TEM2 shunting locomotive, spatial dynamic model, spring suspension, vertical dynamic coefficient, frame forces, universal mechanism, modelling of the underframe part, damping characteristics, numerical validation.

References

1. Pekanov A. A. Sostoyanie parka lokomotivov promyshlennykh predpriyatiy: prichiny i sledstviya [The state of the locomotive fleet of industrial enterprises: causes and effects]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute of Natural Monopolies Problems: Railway Engineering]. 2014, Iss. 3(27), pp. 35–39. (In Russian)
2. Khamidov O. R., Yusufov A. M., Kodirov N. S., Zhamilov Sh. F. et al. Otsenka ostatochnogo resursa glavnykh ram manevrovyykh teplovozov [Assessment of the residual resource of main frames of shunting diesel locomotives]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: Technical Sciences]. 2022, Iss. 2–3(95). (In Russian)
3. Ogan'yan E. S. *Kriterii nesushchey sposobnosti konstruktsiy lokomotivov v ekstremal'nykh usloviyakh nagruzheniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Criteria for the load-bearing capacity of locomotive structures under extreme loading conditions: Dr. tech. sci. diss.]. Kolomna, 2004, 389 p. Available at: <https://www.dissercat.com> (accessed: March 09, 2025). (In Russian)
4. Grigor'ev P. S. Opredelenie dinamicheskoy nagruzhennosti nesushchego uzla manevrovogo lokomotiva [Determination of dynamic loading of the load-bearing unit of a shunting locomotive]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2015, Iss. 3(58), pp. 44–46. (In Russian)

5. Tarasov A. E. Otladka i proverka prostranstvennykh dinamicheskikh modeley lokomotivov v Simpack Rail na verkhnem urovne [Adjustment and verification of spatial dynamic models of locomotives in Simpack Rail at the upper level]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative Transport]. 2018, Iss. 1(27), pp. 67–75. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-249-263. (In Russian)
6. Tarasov A. E., Serdobintsev E. V. Modelirovanie dvizheniya rel'sovogo ekipazha v krivoy v Simpack Rail [Modeling the movement of a rail vehicle in a curve in Simpack Rail]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer Research and Modeling]. 2019, vol. 11, Iss. 2, pp. 249–263. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-249-263. (In Russian)
7. Çati Yu., Düzgün M., Kracht F. E. Development of a New Vertical Dynamic Model of a Rail Vehicle for the Analysis of Ride Comfort. *Applied Sciences* (Switzerland). 2024, vol. 14, Iss. 9, p. 3848. DOI: 10.3390/app14093848.
8. Bruni S., Meijaard J. P., Schwab A. L., Rill G. State-of-the-art and challenges of railway and road vehicle dynamics with multibody dynamics approaches. *Multibody System Dynamics*. 2020, vol. 49, Iss. 1. DOI: 10.1007/s11044-020-09735-z.
9. Kozhukhov I. A. Razrabotka dinamicheskoy modeli manevrovogo lokomotiva [Development of a dynamic model of a shunting locomotive]. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science]. 2023, vol. 3, Iss. 7(64), pp. 305–309. (In Russian)
10. Pogorelov D. Yu., Simonov V. A., Yakovlev V. V. Programmnyy kompleks “Universal’nyy mekhanizm” dlya modelirovaniya dinamiki zheleznodorozhnogo transporta [Universal mechanism software complex for railway transport dynamics modeling]. *Zhurnal komp'yuternykh i sistemnykh nauk* [Journal of Computer and System Sciences]. 2015, vol. 54, Iss. 6, pp. 912–920. Available at: <https://www.springer.com> (accessed: April 04, 2025). (In Russian)
11. *Universal’nyy mekhanizm: Rukovodstvo pol'zovatelya UM. Modelirovanie dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhey* [Universal mechanism: User Guide UM. Railway vehicle dynamics modeling]. Available at: <http://www.universalmechanism.com> (accessed: May 10, 2024). (In Russian)
12. *Sayt “Universal’nyy mekhanizm”. Rukovodstvo pol'zovatelya UM. Mekhanicheskaya sistema kak ob’ekt modelirovaniya* [Website “Universal mechanism”. User Guide UM. Mechanical system as a modeling object]. Available at: <http://www.universalmechanism.com> (accessed: May 10, 2024). (In Russian)
13. Kokorev A. I., Bunin B. B., Parkhonin V. A. *Issledovanie vliyaniya uvelichennoy osevoy nagruzki do 23 t na dinamicheskie, prochnostnye i tyagovo-ekspluatatsionnye kharakteristiki. Dinamicheskie i prochnostnye ispytaniya teplovoza 2TE10L s nagruzkoy ot osi na rel'sy 23 tonny* [Study of the influence of increased axle load up to 23 tons on dynamic, strength and traction-operational characteristics. Dynamic and strength tests of the 2TE10L diesel locomotive with an axle load of 23 tons: Technical report on research work № I-28-74. Research report I-01-94. VNITI]. Kolomna, 1974, 218 p. (In Russian)

Received: June 14, 2025

Accepted: July 11, 2025

Author’s information:

Pavel S. GRIGOREV — PhD in Engineering, Associate Professor; grigorev.p@gmail.com

Nozimzhon S. KODIROV — Postgraduate Student; nazimzhank@bk.ru