

Выпуск 1 (263)

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ



Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Уральский государственный университет путей сообщения

Выпуск 1 (263)

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ

RAILWAY TRANSPORT AND TECHNOLOGIES

Сборник трудов
Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием
(Екатеринбург, 27–28 ноября 2024 года)

Екатеринбург
УрГУПС
2025

УДК 656
Ж51

Железнодорожный транспорт и технологии : сборник трудов Всероссийской научно-практической Ж51 конференции с международным участием (Екатеринбург, 27-28 ноября 2024 года) / под науч. ред. С. В. Бушуева, канд. техн. наук; отв. за выпуск В. В. Макаров. — Екатеринбург : УрГУПС, 2025. — Вып. 1 (263). — 583, [1] с.
ISBN 978-5-94614-598-5

В сборник включены материалы Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Железнодорожный транспорт и технологии» («Railway transport and technologies», RTT-2024), проведенной ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения» 27-28 ноября 2024 г.

К участию в конференции приглашены доктора и кандидаты наук, научные работники, соискатели ученых степеней, преподаватели, аспиранты, магистранты вузов, специалисты ОАО «РЖД», железных дорог и предприятий — производителей железнодорожной техники.

Представленные материалы заинтересуют специалистов в области железнодорожного машиностроения, специалистов и исследователей в области управления, логистики, организации производства в сфере транспортного машиностроения, строительной отрасли, а также в области управления персоналом и социологии.

The collection includes materials from the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Railway transport and technologies» (RTT 2024) which took place on November 27-28, 2024 at Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg.

Scientists, researchers, practical specialists from JSC Russian Railways, railways and railway equipment manufacturing enterprises were invited to participate in the conference.

The presented materials will be interested to specialists in the field of railway engineering, specialists and researchers in the field of management, logistics, production organization, in the field of transport engineering, the construction industry, as well as in the field of personnel management and sociology.

УДК 656

Публикуется по решению редсовета УрГУПС

Рецензенты:

Б. М. Готлиб, д-р техн. наук, Уральский государственный университет путей сообщения
Н. Ф. Сирина, д-р техн. наук, Уральский государственный университет путей сообщения

Редколлегия:

Н. О. Фролов, канд. техн. наук, А. А. Ковалев, канд. техн. наук, Б. В. Рожкин, канд. техн. наук, И. Л. Парахненко, канд. техн. наук, Л. Б. Гилев, канд. техн. наук, Д. Г. Неволин, д-р техн. наук, С. В. Рачек, д-р эконом. наук, Е. Н. Тимухина, д-р техн. наук, Л. В. Гашкова, канд. техн. наук, Ю. Е. Жужгова, канд. техн. наук, А. В. Мартыненко, канд. физ.-мат. наук, В. С. Тарасян, канд. физ.-мат. наук, И. И. Гаврилин, канд. биолог. наук, Т.Б. Марущак, канд. эконом. наук, О. Н. Шестопалова, канд. социолог. наук, С. Г. Аккерман, канд. техн. наук

ISBN 978-5-94614-598-5

© Оформление. Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), 2025

УДК 625.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПОРНОГО СЕДЛА ПО КРИТЕРИЯМ КОМФОРТА ПАССАЖИРОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПО ГИБКОЙ РЕЛЬСО-СТРУННОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЕ UST

А. Э. Юницкий

А. С. Хлебус

М. И. Цырлин, канд. техн. наук

ЗАО «Струнные технологии», Минск, Республика Беларусь

В пассажирских транспортных перевозках комфорт как субъективное ощущение человеком хорошего самочувствия в условиях воздействия внешних факторов, включающих вибрацию и шум [1], является ключевым критерием, который определяет конструкцию элементов любой транспортной системы.

В нормативных документах [2–5] описываются основные положения, которые необходимо принимать во внимание при проектировании и эксплуатации транспортных систем.

Гибкие путевые структуры транспортных комплексов uST [6] имеют в своем составе участки, на которых струнный рельс примыкает к промежуточным опорам, и для обеспечения комфорта пассажиров и несущей способности струнного рельса здесь необходимо применение специальных конструктивных решений в виде опорных сёдел (балок переменной жёсткости) [7], которые обеспечат требуемую траекторию при движении рельсового электромобиля — юнимобиля [8].

При проектировании опорных сёдел отдельной инженерная задача заключается в подборе функции изменения изгибной жёсткости балки, которая обеспечит идеальную траекторию пути юнимобиля, близкую к переходной кривой с переменным радиусом кривизны и удовлетворяющую критериям комфорта во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок. Кроме этого, необходимо учитывать технологические и производственные возможности при изготовлении, транспортировке и монтаже такой конструкции на промежуточную опору гибкой рельсо-струнной путевой структуры.

По результатам ранее выполненных исследований [7] в качестве критериев оценки комфорта при проезде промежуточных опор на стадии проектирования опорных сёдел uST используются максимальная величина вертикального ускорения a_z , измеренного в контрольных точках контакта пассажиров с полом (перевозка стоя) или сиденьем (перевозка сидя) юнимобиля при проезде опорного седла с заданной скоростью. Установленный предел $a_z < 1 \text{ м/с}^2$, целевое значение $a_z < 0,5 \text{ м/с}^2$ (главный критерий); средняя величина рывка $j_z \text{ (м/с}^3\text{)}$, рассчитанная как тангенс угла наклона характерных участков графика вертикального ускорения (т. е. производная главного критерия). Рекомендуемый предел $j_z < 2 \text{ м/с}^3$, целевое значение $j_z < 0,5 \text{ м/с}^3$ (дополнительный критерий).

Необходимо сконструировать балку переменной жёсткости, выполняющую роль опорного седла, которая обеспечит требуемый уровень комфорта пассажиров (максимальное вертикальное ускорение $a_z < 0,5 \text{ м/с}^2$ при максимальной величине рывка $j_z < 2 \text{ м/с}^3$) при прохождении юнимобилем полной массой 1600 кг промежуточных опор с заданной скоростью движения 9 м/с (32,4 км/ч). Требуется провести анализ влияния длины и функции изменения изгибной жёсткости седла на показатели плавности хода юнимобиля.

Разработана конечно-элементная модель гибкой рельсо-струнной путевой структуры транспортно-инфраструктурного комплекса «Юнилайт», расположенной в экопарке «Акварель», г. Марьина Горка, Республика Беларусь (рис. 1, 2). Геометрия поперечных сечений элементов, вертикальные отметки опорных узлов, а также граничные условия в полной мере соответствуют реальной конструкции пути.



Рис. 1. Транспортно-инфраструктурный комплекс «Юнилайт» в экопарке «Акварель» (г. Марьина Горка, Республика Беларусь)

Путевая структура предназначена для доставки грузов и пассажиров к различным рекреационным зонам, представлена двумя анкерными и тремя промежуточными опорами с одной промежуточной поворотной опорой (поворот на 17°). Общая протяжённость пути — около 1120 м, максимальная длина пролёта — 258 м, предварительное натяжение несущих элементов пути — 42 т, погонная масса элементов рельса — около 9 кг.

Использован статический линейно-упругий расчёт по теории второго порядка, который позволяет определять величины в сечениях (силы, моменты, напряжения, деформации) в любой точке конструкции на основе линейного деформирования строительных материалов и геометрии деформированной несущей конструкции, т. е. с учётом нелинейности деформаций [9].

Результаты исследования основаны на серии расчётов (таблица), в каждой из которых изменяется только один из трёх параметров (рис. 3), определяющих геометрию балки переменной жёсткости, далее оценивается влияние изменяемого параметра на показатели плавности хода — ускорение a_z и рыбок j_z подрессоренной массы юнимобиля при проезде промопоры со скоростью 9 м/с.

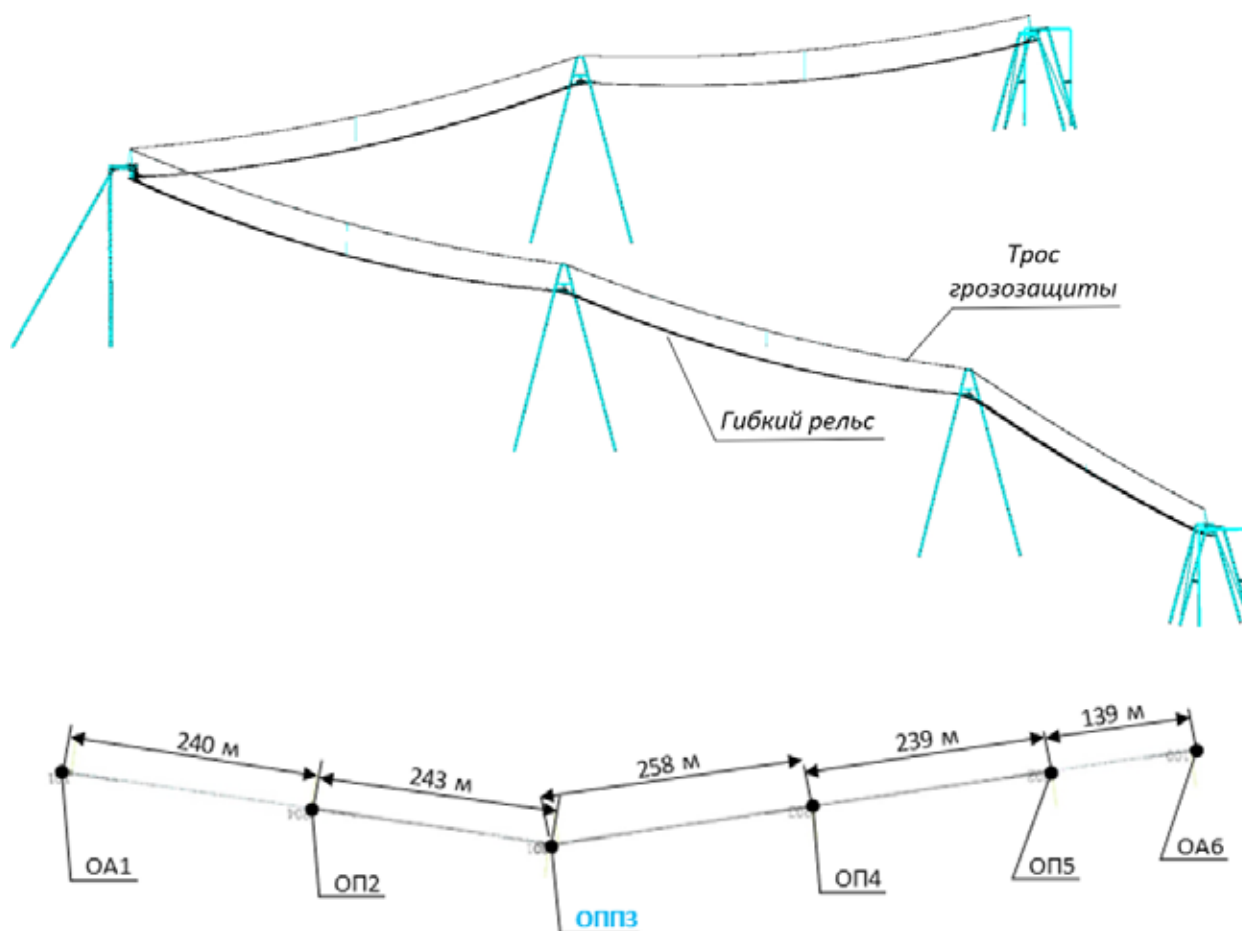


Рис. 2. Общий вид расчётной конечно-элементной модели гибкой рельсо-струнной путевой структуры комплекса «Юнилайт»

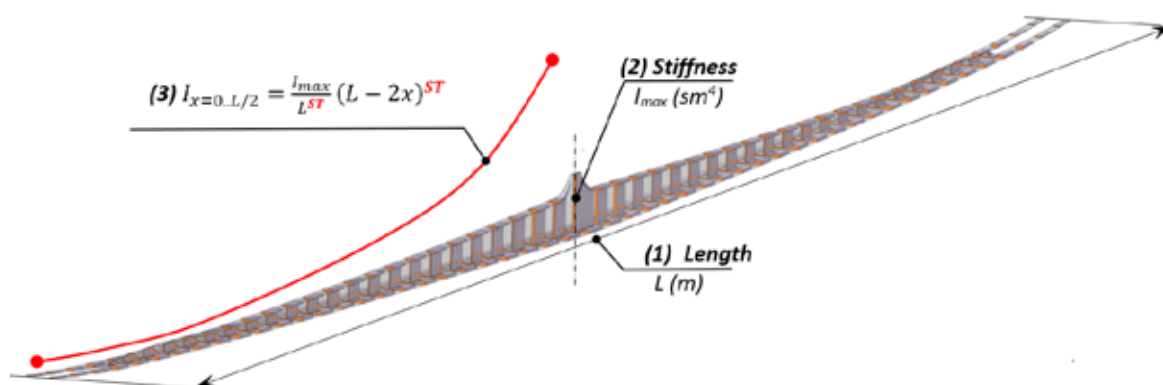


Рис. 3. Исследуемые параметры опорного седла, определяющие геометрию балки переменной жёсткости: 1 – Length, длина седла; 2 – Stiffness, момент инерции поперечного сечения седла в месте примыкания к промопоре, определяющий максимальную изгибную жёсткость балки; 3 – ST, показатель степени нелинейности упругой характеристики седла

Значения исследуемых параметров в серии расчётов

Параметр модели седла	Длина седла Length, м	Момент инерции, тхм , Stiffness, см^4	Показатель степени нелинейности ST
Серия 1 – исследуемый параметр Length	15	24000	3
	20	24000	3
	26	24000	3
	30	24000	3
	50	24000	3
Серия 2 – исследуемый параметр Stiffness	26	6000	3
	26	12000	3
	26	24000	3
	26	36000	3
Серия 3 – исследуемый параметр ST	26	24000	2
	26	24000	3
	26	24000	4

Для анализа влияния длины седла (параметр Length) на максимальные величины вертикального ускорения и рывка исследованы пять вариантов балки переменной жёсткости с длиной 15, 20, 26, 30 и 50 м. При этом максимальный момент инерции поперечного сечения седла (параметр Stiffness), равный 24 000 см^4 , и показатель степени нелинейности функции изменения изгибной жёсткости на длине седла (параметр ST), равный 3, для всех пяти вариантов остаются одинаковыми.

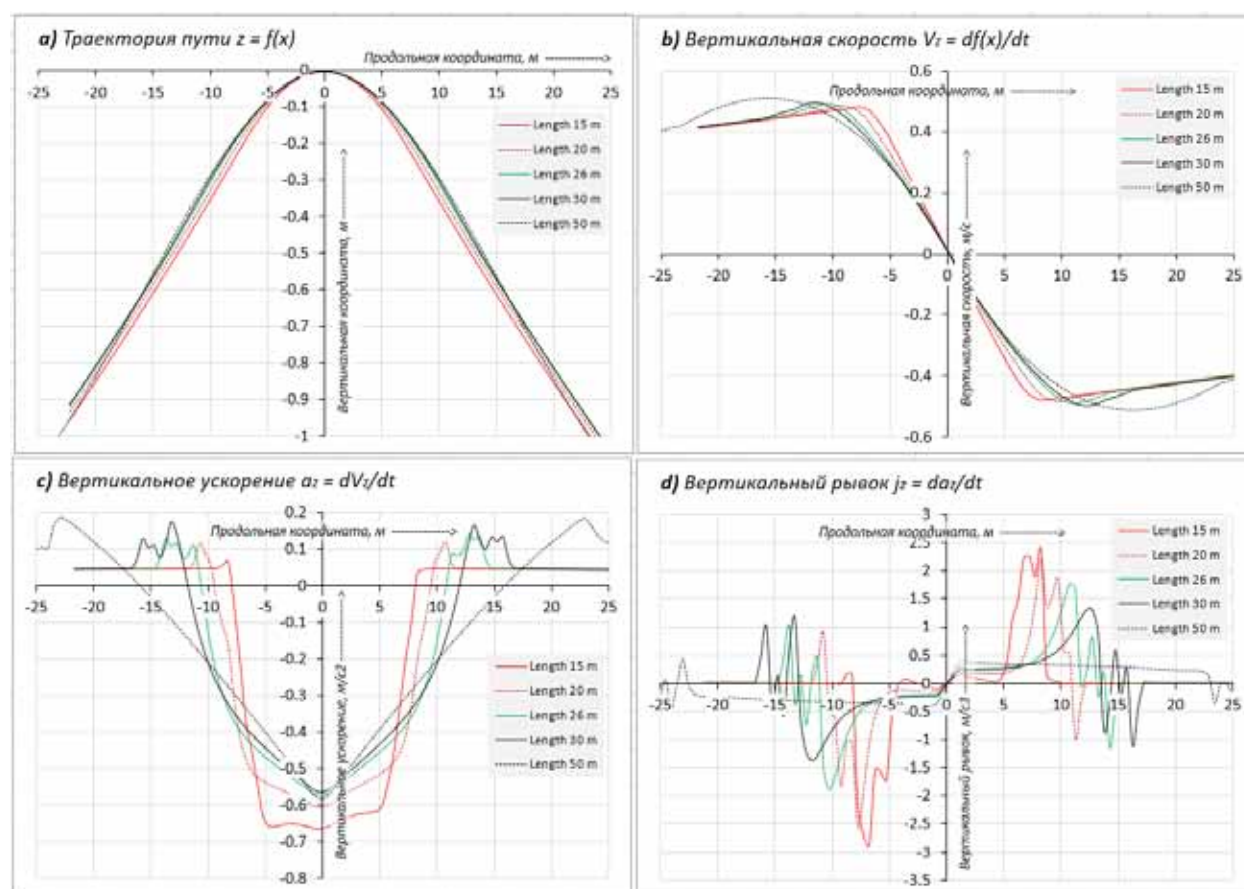


Рис. 4. Графики изменения физических величин для оценки плавности хода в зависимости от продольной координаты, где 0 – это ось промопоры и точка примыкания опорного седла:
 a – вертикальная координата; b – вертикальная скорость; c – вертикальное ускорение;
 d – вертикальный рывок

Как видно из графиков, длина седла при одинаковом максимальном моменте инерции существенно влияет на вертикальный рывок и незначительно на вертикальное ускорение при проезде промежуточных опор гибких рельсо-струнных путевых структур. Поэтому в качестве критерия по выбору оптимальной длины на этапе проектирования рекомендуется использовать баланс между показателями плавности хода и габаритами седла, которые напрямую повлияют на его материалоемкость и стоимость, удобство производства, транспортировки и монтажа.

Для анализа влияния максимальной изгибной жёсткости (параметр Stiffness) на величины вертикального ускорения и рывка исследованы четыре варианта балки переменной жёсткости с наибольшим моментом инерции поперечного сечения в месте примыкания к промопоре, равными 6000, 12000, 24000 и 36000 см⁴. При этом длина седла (параметр Length), равная 26 м, и показатель степени нелинейности функции изменения изгибной жёсткости на длине седла (параметр ST), равный 3, для всех четырёх вариантов остаются одинаковыми.

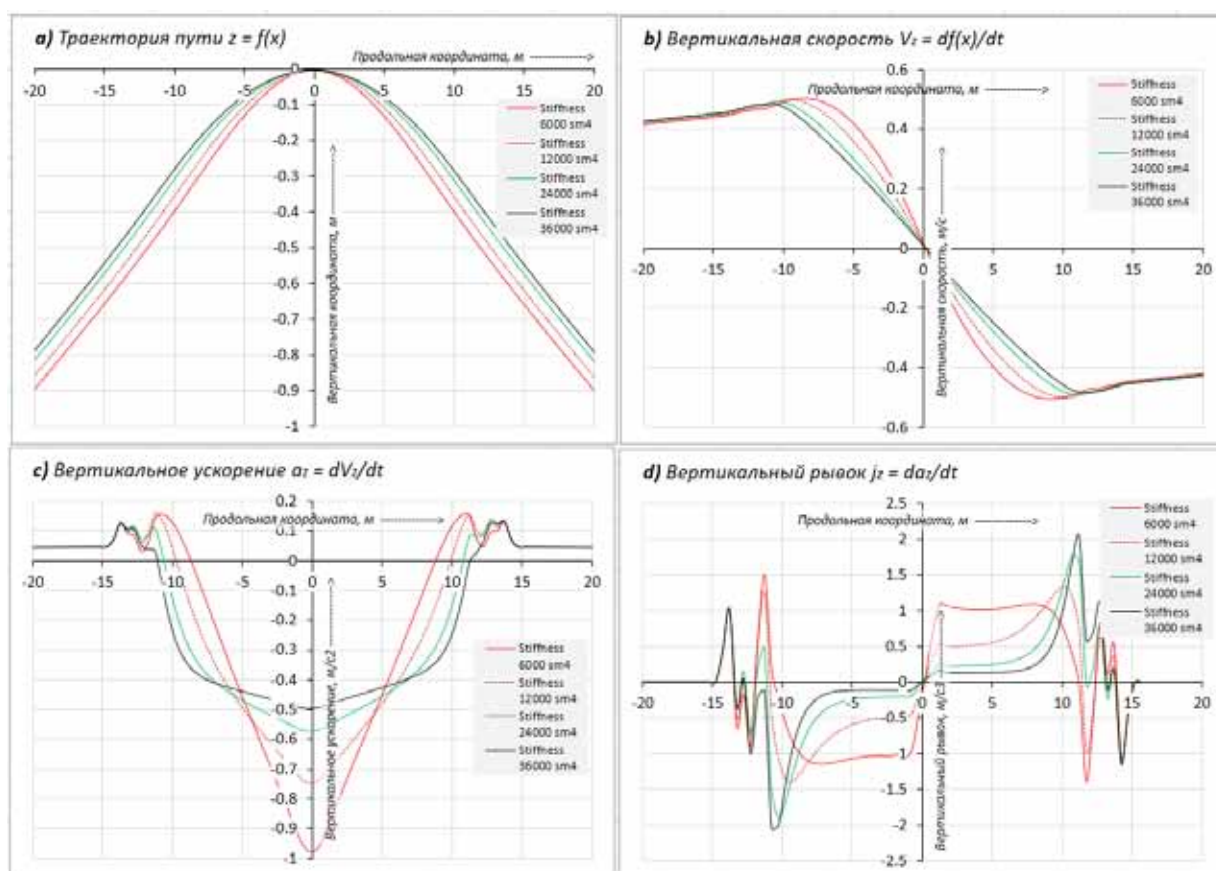


Рис. 5. Графики изменения физических величин для оценки плавности хода в зависимости от продольной координаты, где 0 — это ось промопоры и точка примыкания опорного седла: а — вертикальная координата; б — вертикальная скорость; с — вертикальное ускорение; д — вертикальный рывок

Как видно из графиков, изгибная жёсткость напрямую влияет на максимальную величину вертикального ускорения при проезде промопоры — главного критерия плавности хода, следовательно, на этапе проектирования является первоочередным параметром при определении геометрических параметров седла. Но необходимо отметить, что чрезмерное увеличение максимального момента инерции при ограниченной длине седла увеличивает значение вертикального рывка при заезде юнимобиля на седло, что ухудшит плавность хода по данному критерию.

Для анализа влияния показателя степени нелинейности функции изменения изгибной жёсткости на длине седла (параметр ST) на максимальные величины вертикального ускорения

и рывка исследованы три варианта балки переменной жёсткости с показателями степени 2, 3 и 4. При этом длина седла (параметр Length), равная 26 м, и максимальный момент инерции поперечного сечения седла (параметр Stiffness), равный 24000 см⁴, для всех трёх вариантов остаются одинаковыми.

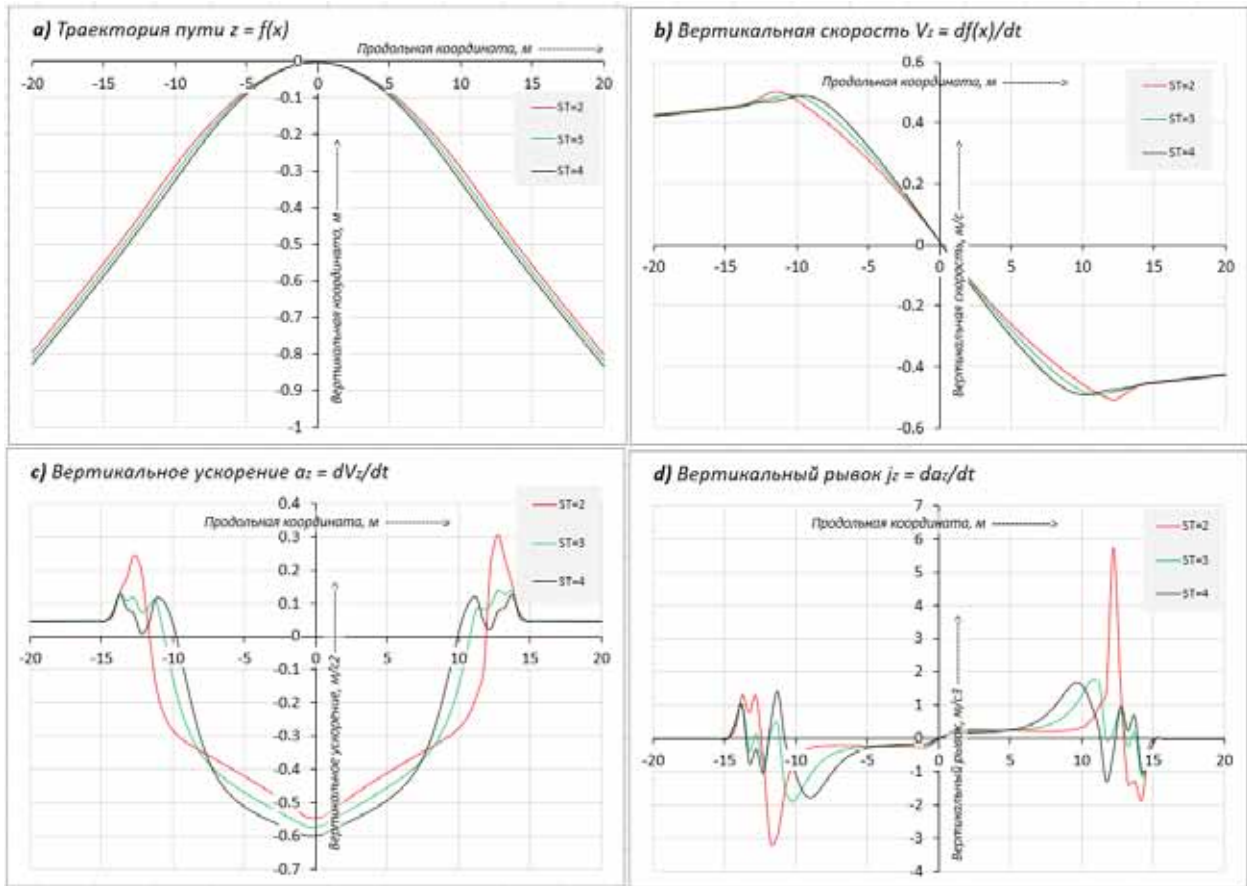


Рис. 6. Графики изменения физических величин для оценки плавности хода в зависимости от продольной координаты, где 0 – это ось промопоры и точка примыкания опорного седла:
 а – вертикальная координата; б – вертикальная скорость; в – вертикальное ускорение;
 д – вертикальный рывок

Анализ графиков показывает, что показатель степени нелинейности изгибной жёсткости седла влияет на вертикальное ускорение не так существенно, как на рывок. Для практического использования на стадии проектирования опорного седла рекомендуется использовать ST не менее 3, но не более 4, так как меньшие значения значительно увеличат рывок при заездах на седло, а значения выше обозначенного диапазона увеличат максимальное вертикальное ускорение при проезде середины седла.

По результатам исследования влияния длины и функции изменения изгибной жёсткости седла на показатели плавности хода юнимобиля применительно к гибкой путевой структуре комплекса «Юнилайт», для разработки геометрии опорного седла были выбраны следующие значения ключевых параметров: длина седла (параметр Length) – 26 м, максимальный момент инерции поперечного сечения в месте примыкания к промопоре (параметр Stiffness) – 24000 см⁴, показатель степени нелинейности функции изменения изгибной жёсткости на длине седла (параметр ST), равный 3.

После конструкторской проработки геометрии балки переменной жёсткости с учётом технологических особенностей было получено опорное седло с требуемым изменением момента инерции поперечного сечения (рис. 7) массой около 1900 кг при полной длине 26 м и максимальной высотой двутаврового сечения не более 400 мм. Последующая проверка показателей плавности хода расчётным методом выявила незначительное превышение вертикального

ускорения и рывка от целевых значений ($a_z < 0,5 \text{ м/с}^2$, $j_z < 2 \text{ м/с}^3$). Чтобы не увеличивать материалоёмкость опорного седла, был использован противовыгиб балки по линии, близкой к эллипсу, на максимальную величину до 220 мм, что окончательно обеспечило соответствие показателей плавности хода предъявленным ранее требованиям (рис. 7, 8).

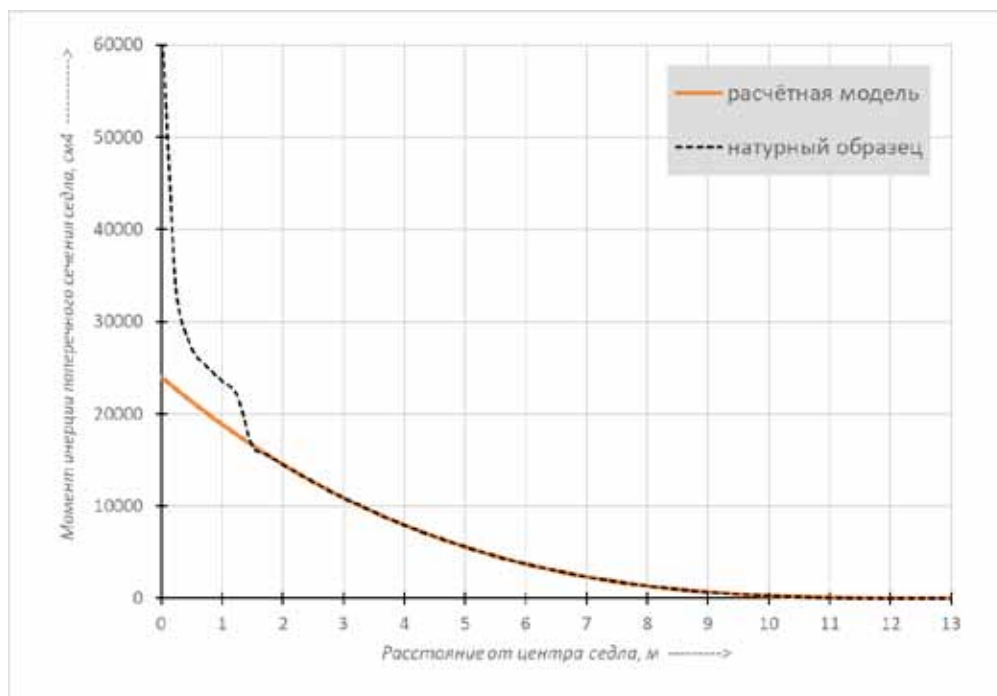


Рис. 7. Изменение момента инерции поперечного сечения на длине опорного седла (сплошная линия — расчётная модель, штриховая — натурный образец после выпуска конструкторской документации)

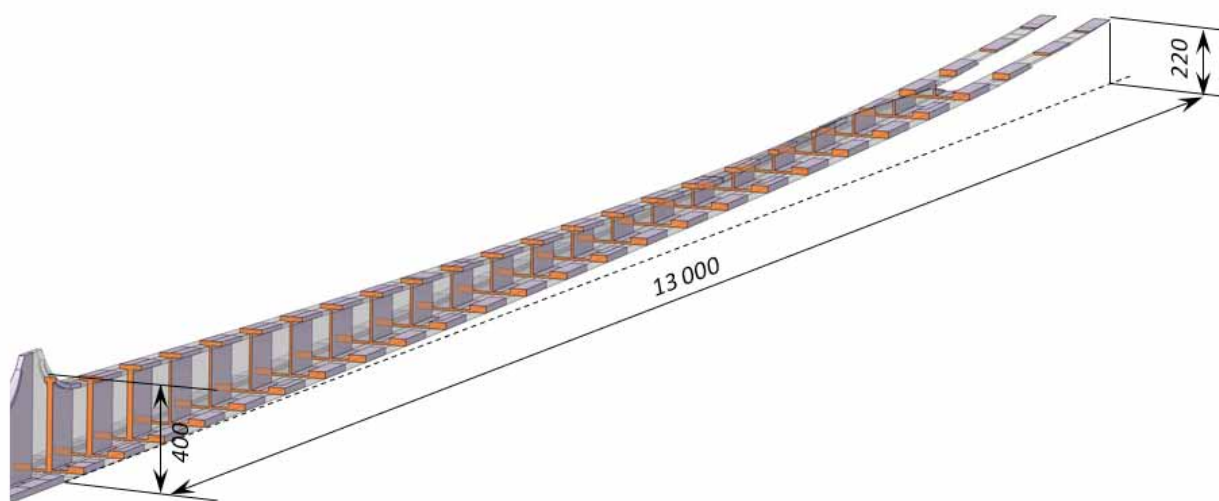


Рис. 8. Общий вид половины седла с противовыгибом после завершения конструкторской разработки

После ввода в эксплуатацию гибкой рельсо-струнной путевой структуры «Юнилайт» (2023 г.) в ходе тестирования инженеры испытательного центра компании UST провели натурные измерения уровня вибраций в салоне юнимобиля. В качестве измерительного оборудования использовался комплекс измерительный для проведения виброакустических испытаний на базе регистратора Simcenter Scadas с расположением акселерометров на полу юнимобиля для оценки показателей плавности хода для стоящих пассажиров.

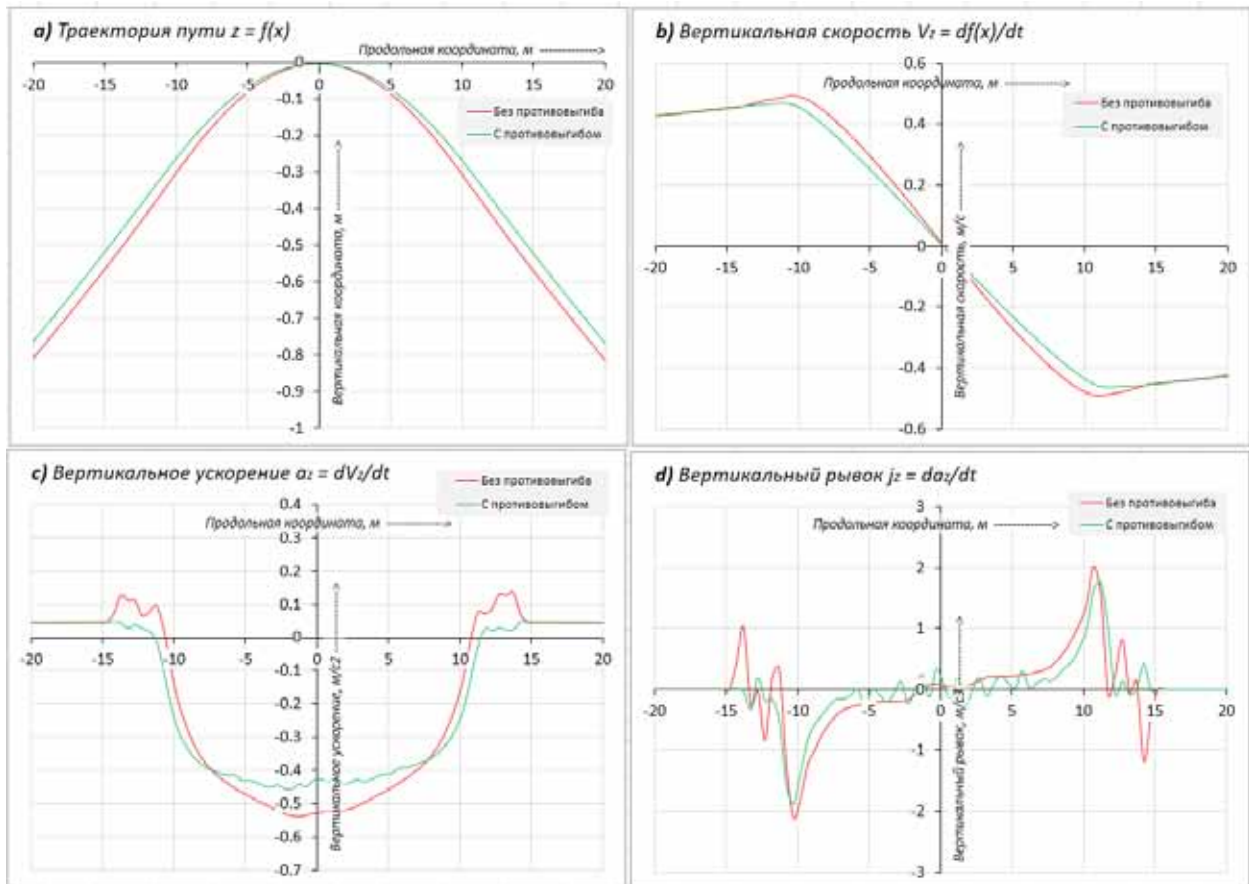


Рис. 9. Графики изменения физических величин для оценки плавности хода в зависимости от продольной координаты, где 0 — это ось промопоры и точка примыкания опорного седла:
 а — вертикальная координата; б — вертикальная скорость; в — вертикальное ускорение;
 д — вертикальный рывок

На рис. 10 представлены графики параметров движения юнимобиля от одной анкерной опоры до другой. Красной линией — изменение продольной скорости юнимобиля, зеленой прерывистой — вертикальной координаты по GPS-сигналу, черными прерывистыми вертикальными линиями обозначены моменты проезда осей промежуточных опор. Первая, третья и четвертая промежуточные опоры расположены на прямолинейных участках пути с проектной скоростью движения юнимобиля около 30 км/ч, вторая промежуточная опора — поворотная — обеспечивает поворот пути на 17°, имеет горизонтальный радиусный участок с ограничением скорости движения до 5 км/ч. Для обеспечения требуемого уровня комфорта при проезде промежуточных опор применены опорные сёдла вышеописанной конструкции.

На рис. 10, а синим цветом представлен исходный сигнал вертикального ускорения, полученный измерительной аппаратурой, без фильтрации и корректировок; на рис. 10, б — тот же сигнал, скорректированный фильтром W_k , чувствительным для человека. Максимальное скорректированное значение вертикального ускорения в зоне третьей промежуточной опоры составило 0,85 м/с².

В работе вычислялось среднеквадратичное отклонение (СКО) скорректированного ускорения на всём интервале измерений (чёрная кривая, рис. 11) и текущее СКО с интервалом 1 с (синяя кривая, рис. 11). Максимальное значение СКО за весь интервал измерений составляет 0,061 м/с², текущего СКО — 0,26 м/с².

Так как пик-фактор, определяемый как отношение максимального значения мгновенного скорректированного виброускорения (0,85 м/с²) к его СКО на всём интервале измерений (0,061 м/с²), равен 13,9, что больше 9, то комфорт при движении юнимобиля оценивали по максимальному текущему СКО, равному 0,26 м/с². Согласно данным [1] о возможной реакции

человека на различные значения вибрации в условиях общественного транспорта, дискомфорт не ощущается, если значение ниже $0,315 \text{ м/с}^2$.

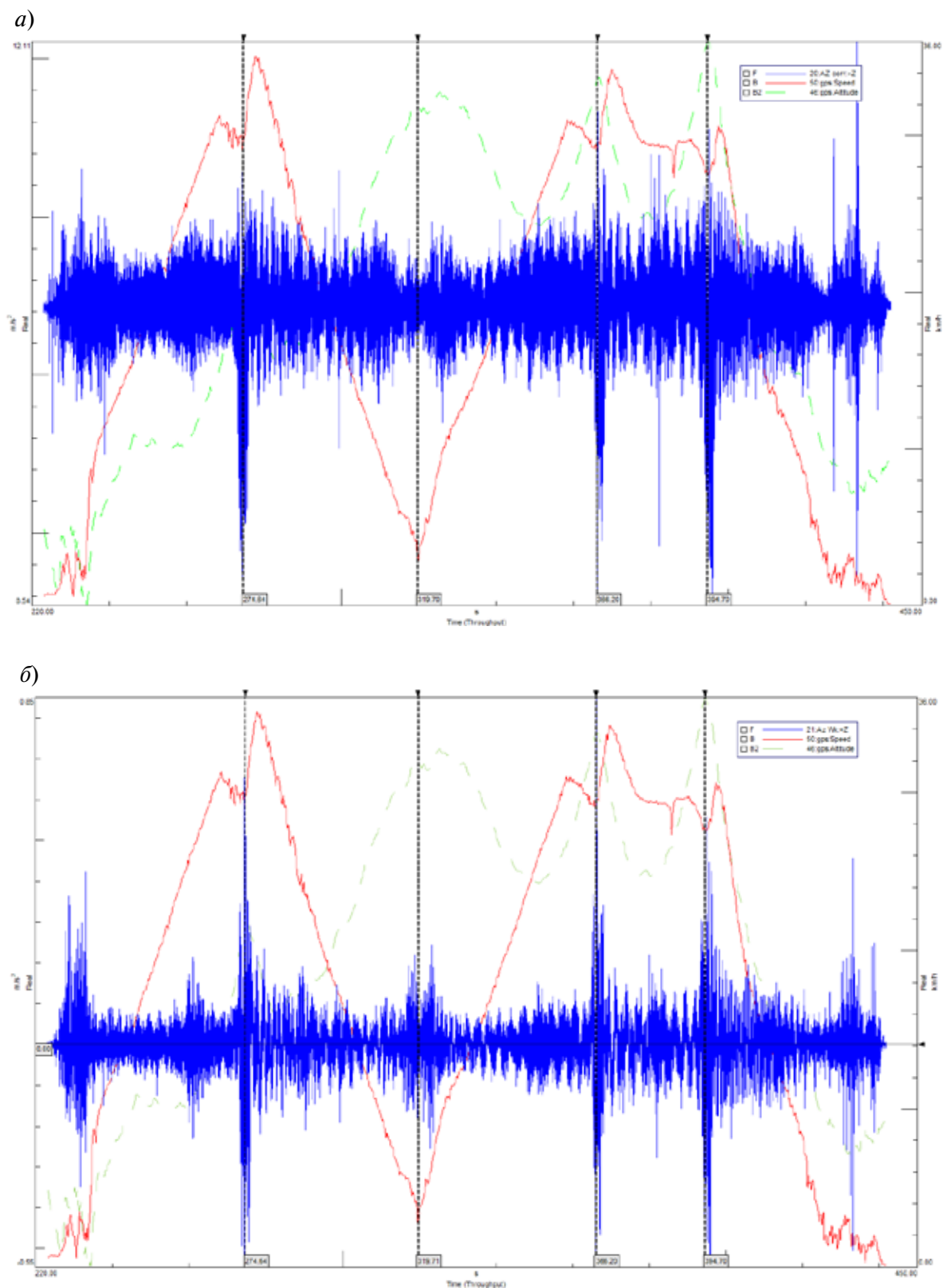


Рис. 10. Графики параметров движения юнимобиля от одной анкерной опоры до другой по результатам натурных измерений:
 а — исходные сигналы без фильтрации и корректировок; б — сигнал вертикального ускорения скорректирован фильтром Wk , чувствительным для человека

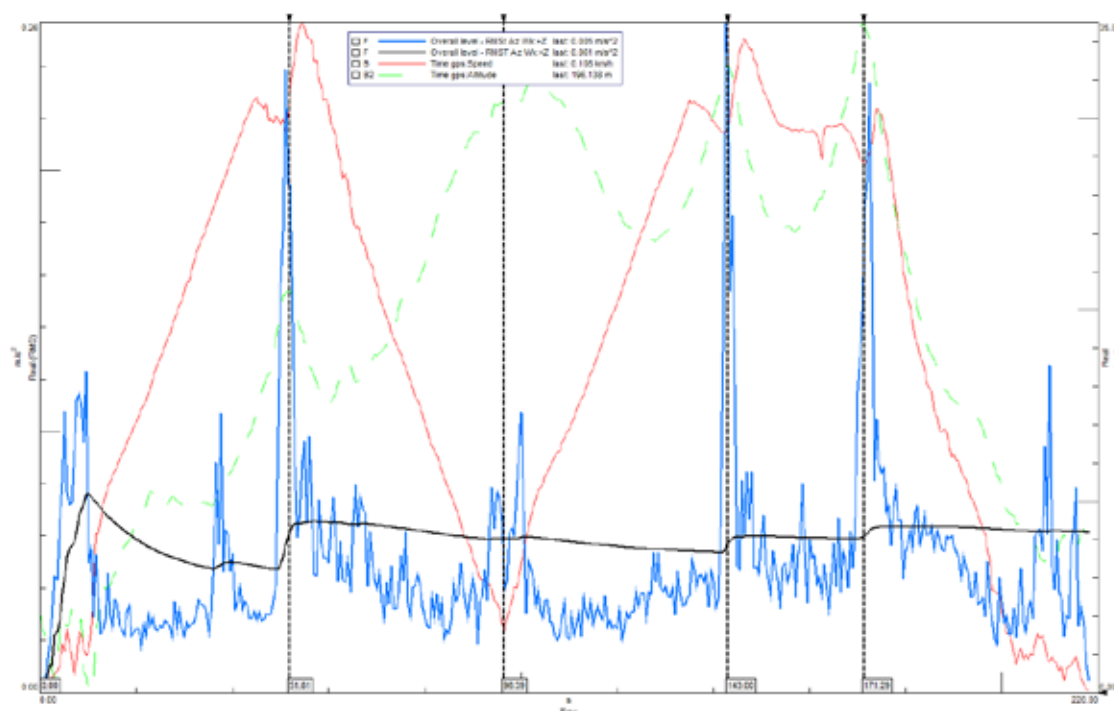


Рис. 11. Графики параметров движения юнимобиля от одной анкерной опоры до другой по результатам натурных измерений с выделением среднеквадратичного значения сигнала вертикального ускорения на всем интервале измерения (черная линия) и с интервалом 1 с (синяя линия)

Таким образом, выбор на стадии проектирования в качестве критериев оценки плавности хода юнимобиля при проезде промежуточных опор гибких путевых структур uST максимальных значений вертикальных ускорений и рывка оправдан, так как позволяет качественно сравнивать различные варианты опорного седла и выбрать оптимальный.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка её воздействия на человека.
- Гигиенический норматив Республики Беларусь «Показатели безопасности и безвредности вибрационного воздействия на человека», № 347 от 19.06.2021.
- BS 6841:1987 Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock.
- ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements.
- ASCE ANSI/ASCE/T&DI 21-13. Automated People Mover Standards.
- Юницкий, А. Э., Хлебус, А. С., Цырлин, М. И. Оценка жёсткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ) // Инновационные транспортные системы и технологии. — 2022. — Т. 8, № 3. — С. 45–62.
- Юницкий, А. Э., Хлебус, А. С., Цырлин, М. И. Влияние опорного седла на комфорт пассажиров при движении подвижного состава по гибкой рельсо-струнной путевой структуре uST// Железнодорожный транспорт и технологии : сб-к трудов конференции. — Екатеринбург : УрГУПС, 2025. — С. 210–217.
- Юницкий, А. Э., Гарах, В. А., Зайцев, А. Д., Цырлин, М. И. Конструктивные особенности юникара тропического для городских перевозок пассажиров // Инновационный транспорт. — 2021. — № 1. — С. 8–15.
- Жидков, А. В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. — Нижний Новгород : НГУ, 2006. — 115 с.