

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. Тарсян, 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

ВЛИЯНИЕ ОПОРНОГО СЕДЛА НА КОМФОРТ 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

Основная задача любой транспортной системы заключается в перемещении пассажиров и/или грузов на определенное расстояние за минимально короткое время при условии соблюдения нормативных требований по безопасности и безвредности для здоровья человека и окружающей среды. Существует ряд как национальных нормативных документов, так и международных, описывающих основные факторы, которые необходимо принимать во внимание при проектировании и эксплуатации транспортных систем.

В части пассажирских перевозок при оценке любой поездки чаще всего используется термин «комфорт». Под комфортом понимается субъективное ощущение человеком хорошего самочувствия в условиях воздействия внешних факторов, включая вибрацию и шум [1]. В условиях современного общественного транспорта комфорт пассажиров в основном определяется возможной реакцией человека на различные значения полной вибрации, которая воздействует на тело пассажира через опорные поверхности и напрямую связана с ровностью пути и скоростью движения транспортного средства.

Гибкая путевая структура как один из элементов транспортных комплексов uST – это путевая структура, в которой вертикальный прогиб в основном зависит от усилия предварительного натяжения, массы рельсового электромотовоза на стальных колёсах (юнимобили) и температуры, но почти не зависит от изгибной жёсткости рельсовых и несущих элементов ввиду их малой высоты по отношению к длине пролёта – при их соотношении 1:100 и более (рис. 1, 2) [2]. В качестве подвижного состава в uST используются юнимобили – автоматизированные рельсовые электромотовозы различного типа в зависимости от их функционального назначения [3].



Рис. 1. Пример трёхпролётной гибкой путевой структуры uST общей длиной 400 м (100 + 200 + 100) в г. Шарджа, ОАЭ (год строительства 2019)



Рис. 2. Пример пятипролётной гибкой путевой структуры uST «Юнилайт» общей длиной 1120 м (г. Марьина Горка, Республика Беларусь; год строительства 2023)

С точки зрения логистики, юнимобиль должен проезжать промежуточные опоры с той же скоростью, что и при движении в пролёте, а это требует применения специальных конструктивных решений в виде опорных сёдел (балки переменной жёсткости) для обеспечения требуемой траектории (вертикального радиуса кривизны путевой структуры) и приемлемого уровня комфорта для пассажиров, определяемого центробежными силами при прохождении кривой.

Если не применять опорное седло в зоне примыкания к промежуточной опоре струнного рельса, то из-за его невысокой изгибной жёсткости при проезде юнимобиля траектория в зоне перегиба будет иметь очень маленький радиус, что может повредить струнный рельс высокими напряжениями от изгиба и существенно ограничит максимальную скорость движения подвижного состава на этом участке по критериям комфорта (из-за высоких центробежных сил на кривой малого радиуса).

Поэтому для соответствия требованиям по несущей способности и эксплуатационной пригодности важно на стадии проектирования и инженерных расчётов определить основные параметры опорного седла (способ примыкания к опоре (шарнирное, жёсткое), длина седла, требуемая максимальная изгибная жёсткость и функция её изменения, которая обеспечит траекторию пути юнимобиля, близкую к переходной кривой требуемого радиуса кривизны); рис. 3.

Геометрические параметры седла будут определяться типом выбранного поперечного сечения (двутавр, тавр, прямоугольник) и соответствием рассчитанной функции изгибной жёсткости его консольных элементов.

Наибольшую сложность при проектировании опорных сёдел вызывает подбор функции изменения изгибной жёсткости балки, которая обеспечит «идеальную» траекторию пути юнимобиля, близкую к переходной кривой с переменным радиусом кривизны, и удовлетворяющую вышеперечисленным критериям 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.

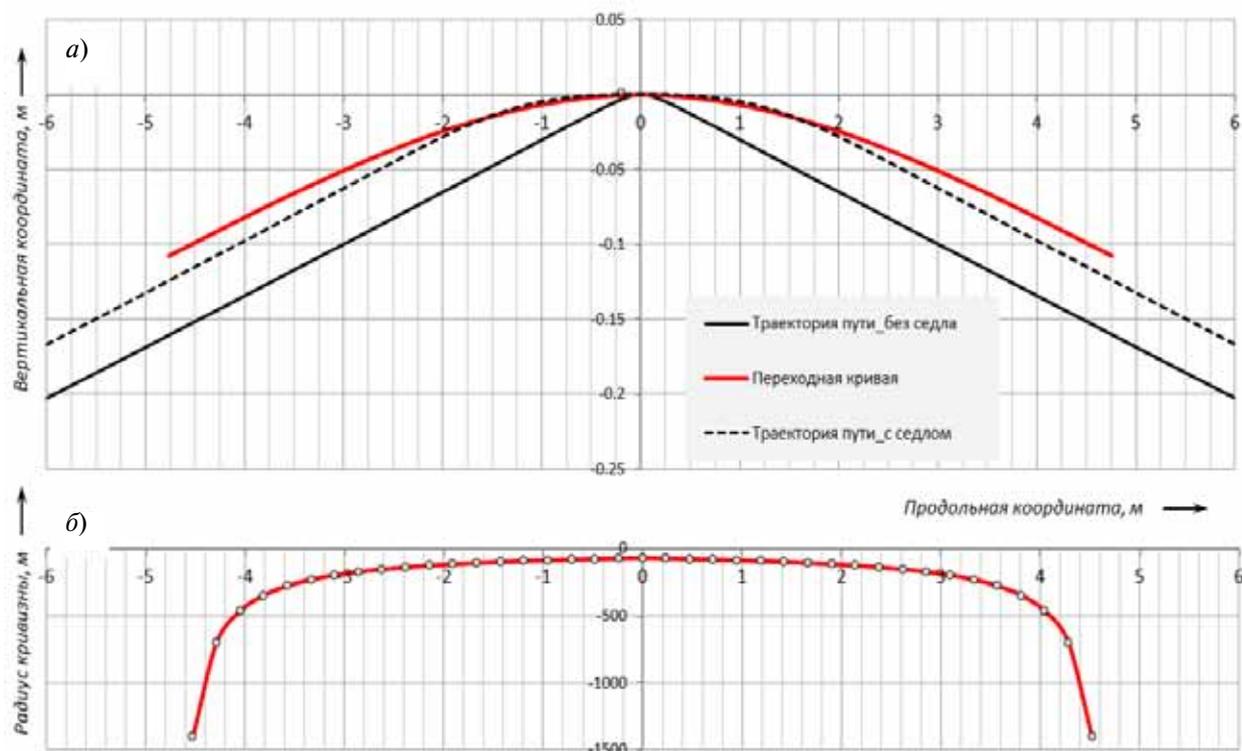


Рис. 3. Влияние опорного седла на траекторию пути юнимобиля в зоне примыкания струнного рельса к промежуточной опоре:
 а – варианты опорных сёдел с изменением изгибной жёсткости по степенной функции, наиболее близкой к переходной кривой на основе кубической параболы;
 б – график изменения кривизны переходной кривой

Выбор критериев оценки уровня комфорта пассажиров при проезде промежуточных опор на стадии проектирования

Главный фактор, негативно влияющий на комфорт пассажиров юнимобиля, – это вибрация. В нормативных документах основной измеряемой величиной вибрации является виброускорение (ускорение; ед. измерения – m/c^2) [1, 4], в некоторые стандартах дополнительно рассматривают скорость изменения ускорения (рывок; ед. измерения – m/c^3) [7].

В таблице 1 приведены нормативные документы, предлагающие различные методики и рекомендации по оценке вибрации с точки зрения её влияния на здоровье и степень комфорта человека.

Таблица 1

Перечень нормативных документов, описывающих различные методики и рекомендации по оценке вибрации

Нормативный документ	Организация, принявшая нормативный документ	Краткое изложение методики по оценке полной вибрации
Гигиенический норматив Республики Беларусь «Показатели безопасности и безвредности вибрационного воздействия на человека» [4]	Совет Министров Республики Беларусь	Определяются нормируемые показатели вибрации (допустимые и предельно допустимые уровни виброускорения общей производственной вибрации 1 категории – транспортной). Нормируются средние квадратические значения виброускорения, измеряемые в октавных или третьоктавных полосах частот, или их логарифмические уровни

Окончание табл. 1

Нормативный документ	Организация, принявшая нормативный документ	Краткое изложение методики по оценке полной вибрации
BS 6841:1987 Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock [5]	Британский институт стандартов	Стандарты рассматривают комфорт как субъективное мнение, вызванное многоосевой вибрацией. Основным методом анализа всех эффектов воздействия вибрации является среднеквадратичное значение (RMS), перед расчётом которого измеренные данные по ускорению должны быть скорректированы по частоте (т.е. отфильтрованы). Целью коррекции данных по ускорению является моделирование частотной характеристики человека.
ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1: General requirements [6]	Международная организация по стандартизации	Кривые частотной коррекции определены для всех осей и точек измерения. Стандарт определяет также повышающие коэффициенты для каждой из осей, чтобы компенсировать различные эффекты вибрации в разных точках и направлениях. Далее полученные значения для каждой оси и местоположения объединяются, чтобы получить общее значение полной вибрации, которая сравнивается с ориентировочными значениями для оценки дискомфорта (таблица 2). Определение рывка приводится, однако его величина не нормируется
ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997) Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка её воздействия на человека [1]	Межгосударственный стандарт (страны СНГ)	Кривые частотной коррекции определены для всех осей и точек измерения. Стандарт определяет также повышающие коэффициенты для каждой из осей, чтобы компенсировать различные эффекты вибрации в разных точках и направлениях. Далее полученные значения для каждой оси и местоположения объединяются, чтобы получить общее значение полной вибрации, которая сравнивается с ориентировочными значениями для оценки дискомфорта (таблица 2). Определение рывка приводится, однако его величина не нормируется
ASCE ANSI/ASCE/T&DI 21-13. Automated People Mover Standards [7]	ANSI (Американский национальный институт стандартов) совместно с ASCE (Американское сообщество инженеров)	Качество движения как один из факторов, напрямую влияющих на комфорт, нормируется установлением пределов для «устойчивого» ускорения (таблица 3) и рывка (таблица 4) для поступательных движений относительно трех осей системы координат на полу транспортного средства над тележкой и в геометрическом центре пола. Понятие «Устойчивый (непрерывный)» относится к номинальным значениям, исключая случайные эффекты вибрации выше 0,5 Гц Рывок определяется как скорость изменения устойчивого ускорения. Пределы рывков, указанные в таблице 4, не должны превышать для изменений скорости в вертикальных и горизонтальных кривых. Рывок в начале экстренного торможения может превышать эти пределы

В дополнение к исследованиям восприятия и комфорта проводились биомеханические исследования, чтобы обеспечить понимание поведения человека при вибрации [8]. Результаты показали, что человеческое тело имеет основной резонанс (т. е. собственную частоту) по вертикальной оси около 4-5 Гц. Результаты для горизонтальных осей (поперечной и продольной) показали резонансные частоты в районе 2-4 Гц.

Таблица 2

Ориентировочные показатели вероятной реакции на различные величины суммарных значений общей вибрации в общественном транспорте согласно ISO 2631-1: 1997 [6]

Амплитуда величины общей вибрации, м/с ²	Реакция на дискомфорт
< 0,315	Дискомфорт не ощущается
0,315–0,63	Легкое ощущение дискомфорта
0,5–1,0	Приемлемое ощущение дискомфорта
0,8–1,6	Отчётливое ощущение дискомфорта
1,25–2,5	Ощущение сильного дискомфорта
> 2,0	Крайняя степень дискомфорта

Таблица 3

Максимально допустимые значения устойчивого ускорения для пассажиров согласно ASCE ANSI/ASCE/T&DI 21-13 [7]

Направление	Стоя	Сидя
Боковое	± 0,10 g	± 0,25 g
Вертикальное	± 0,05 g (± 0,49 м/с ²)	± 0,25 g (± 2,45 м/с ²)
Продольное (эксплуатация)	± 0,16 g	± 0,35 g
Продольное (аварийный)	± 0,32 g	± 0,60 g

Таблица 4

Максимально допустимые значения рывка для пассажиров согласно ASCE ANSI/ASCE/T&DI 21-13 [7]

Направление	Стоя	Сидя
Боковое	0,06 g/c	0,25 g/c
Вертикальное	0,04 g/c (0,39 м/с ³)	0,25 g/c (2,45 м/с ³)
Продольное	0,10 g/c	0,25 g/c

Рассмотренные методики в нормативных документах относятся к стадии эксплуатации, когда возможно проведение натуральных испытаний и измерение уровней вибрации в салоне уже существующего транспортного средства. Однако важно ещё на стадии проектирования и инженерных расчётов опорных сидел выбрать контролируемые параметры в качестве критериев оценки комфорта и обозначить их максимально допустимые значения (пределы).

Исходя из анализа нормативных документов в качестве критериев оценки комфорта при проезде промежуточных опор на стадии проектирования опорных сидел uST используются: главный критерий – максимальная величина вертикального ускорения a_z , измеренного в контрольных точках 3–5 (рис. 4) компьютерной динамической модели юнимобиля во временном диапазоне, соответствующем проезду опорного сидла с заданной постоянной скоростью. Установленный предел $a_z < 1$ м/с², целевое значение $a_z < 0,5$ м/с²; дополнительный критерий – средняя величина рывка j_z (м/с³), рассчитанная как тангенс угла наклона характерных участков графика вертикального ускорения (т. е. производная главного критерия) во временном диапазоне, соответствующем проезду опорного сидла с заданной постоянной скоростью. Рекомендуемый предел $j_z < 2$ м/с³, целевое значение $j_z < 0,5$ м/с³ [9].

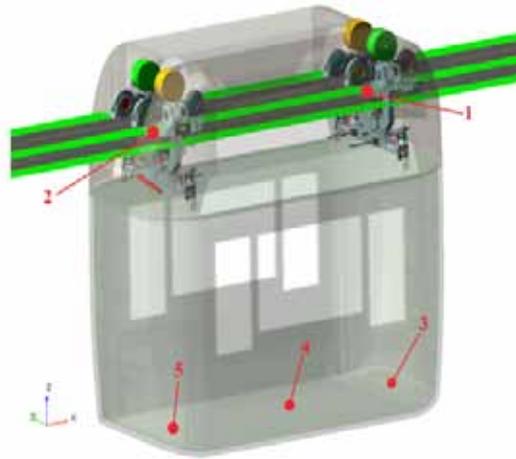


Рис. 4. Контрольные точки расчётной модели юнимобиля «Юнилайт» для анализа виброускорений:
 1, 2 – точки неподдресоренных масс в зоне опорных колёс;
 3, 4 и 5 – точки поддресоренных масс на полу над тележками и в геометрическом центре

Практическое применение критериев оценки уровня комфорта пассажиров при проезде промежуточных опор

В качестве главного и первостепенного критерия оценки уровня комфорта пассажиров выбрано максимальное значение вертикального ускорения, а значение рывка определено в качестве дополнительного критерия; обозначенные предельные значения носят рекомендательный характер, так как на практике мгновенное абсолютное значение (производная от ускорения) и среднеквадратичное значение даже на коротком временном интервале, равном 0,1 с (полосовой фильтр 10 Гц), могут сильно отличаться (рис. 5), что требует более детального подхода при анализе полученных данных.

Как правило, при рассмотрении и качественном сравнении различных конструктивных исполнений опорного седла на стадии проектирования и расчётов проводится имитационное моделирование динамики проезда юнимобилем участка промежуточной опоры с заданной скоростью. При этом в контрольных точках расчётной модели юнимобиля фиксируются виброускорения для их последующей обработки и анализа. Пример результатов такого расчёта приведен на рис. 5.

Как видно из рис. 5, а при заезде юнимобиля на участок седла возрастают колебания вокруг поперечной оси (галопирование), что увеличивает мгновенные значения рывка для пассажиров, стоящие под тележками (линии 3 и 5), в сравнении с пассажирами, стоящими по центру пола (линия 4). В первую очередь это связано с массогабаритными параметрами и колёсной базой самого юнимобиля, и такие колебания могут возникать и в пролёте, например, при трогании/торможении. Однако влияние таких колебаний на величину рывка существенно: при заезде на седло (рис. 5, б) максимальное мгновенное значение составляет около 1 м/с³, а максимум достигает 1,8 м/с³.

Поэтому для исключения влияния подобных колебаний на критерии при проектировании седла предлагается определять рывок по наклону характерных участков графика ускорений, пренебрегая локальными колебаниями поддресоренной массы юнимобиля (рис. 5, а).

На участках 1, 4 и 7 юнимобиль движется по вертикальным кривым постоянного радиуса, а величина вертикального ускорения имеет постоянное значение, поэтому величина рывка примерно равна нулю ($j_1 = j_4 = j_7 = 0$).

На участках 2, 3, 5 и 6 есть движение по переходным кривым, где радиус кривизны изменяется, как и вертикальное ускорение на величину da_i в течение определённого отрезка времени dt_i , где i – номер характерного участка на графике. Рывок j_i на каждом таком участке может быть как отношение da_i (м/с²) на dt_i (с).

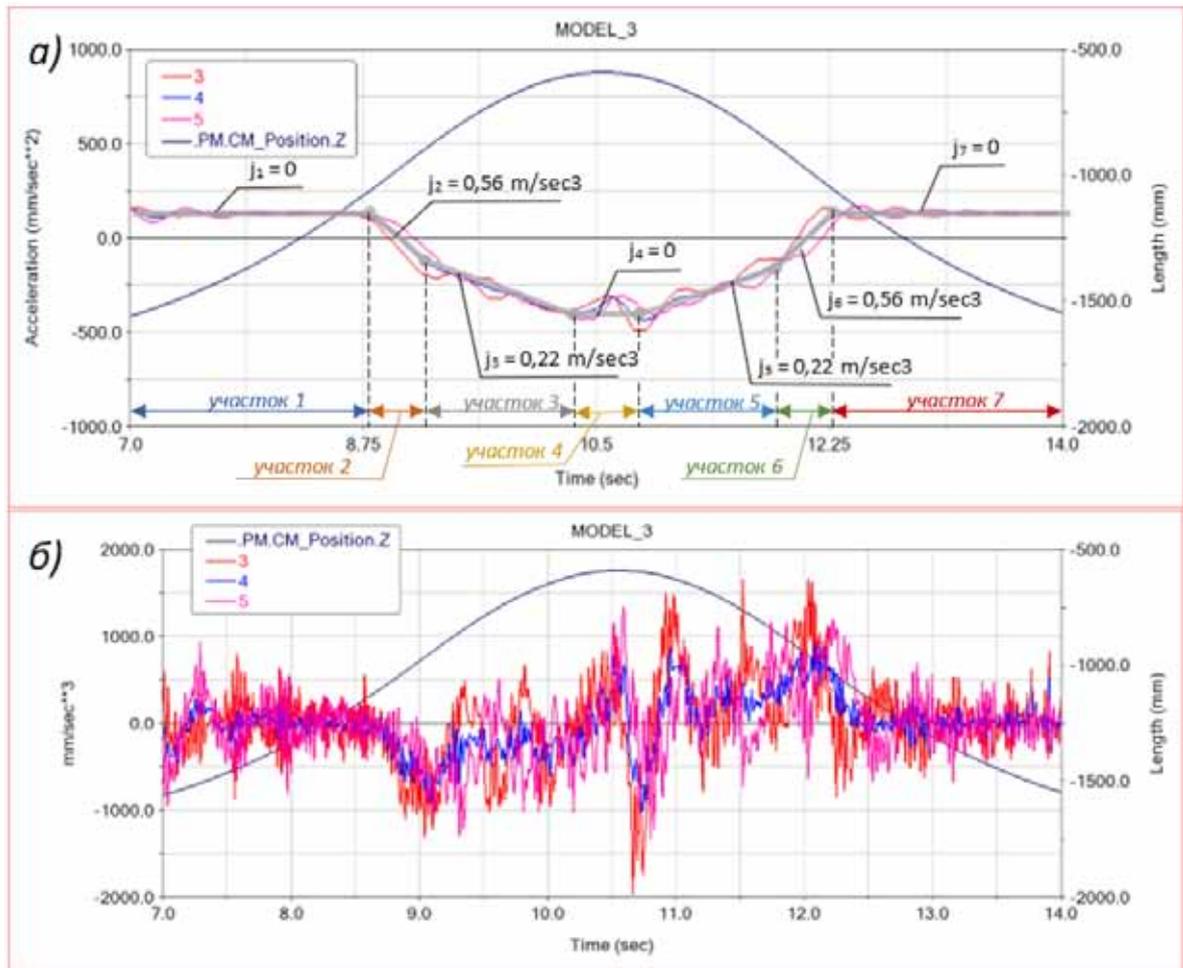


Рис. 5. Пример анализа результатов динамического моделирования проезда юнимобилем опорного седла:

a – предлагаемый метод определения значения рывка как тангенса угла наклона характерных участков графика вертикального ускорения при анализе результатов расчёта; *б* – графики мгновенных абсолютных значений рывка, полученные дифференцированием ускорения (без фильтрации)

На рис. 6 представлены графики изменения вертикального ускорения при проезде промежуточной опоры для трех различных вариантов седла, дан пример сравнения вариантов по уровню комфорта с применением вышеописанных главного и дополнительного критериев.

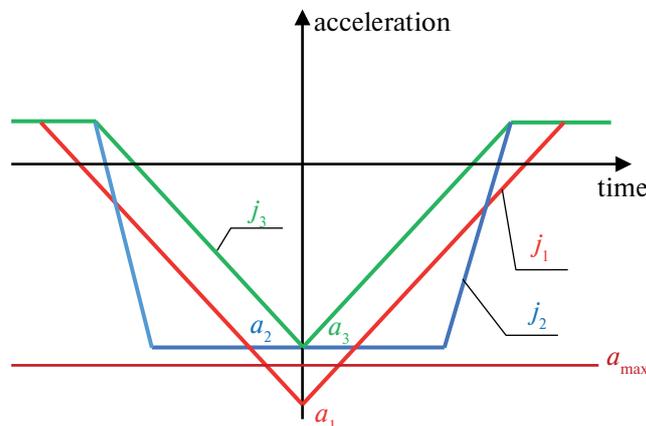


Рис. 6. Применение главного критерия по ускорению (a , m/c^2) и дополнительного по рывку (j , m/c^3) при сравнении трех вариантов седла по уровню комфорта

Известно, что $|a_2| = |a_3| < |a_{\max}|$, $|a_1| > |a_{\max}|$. При этом $|j_1| = |j_3| < |j_{\max}|$, $|j_2| > |j_{\max}|$.

Так как критерий по ускорению является главным и обязательным требованием, то седло 1 (красный) ему не соответствует, а седло 3 (зелёный) обладает преимуществом перед седлом 2 (синий) по дополнительному критерию по рынку.

Таким образом, опорное седло, представляющее собой балку переменной жёсткости, с точки зрения конструирования, производства, монтажа и эксплуатации рельсо-струнных путевых структур является довольно простым, эффективным и надёжным техническим решением, определяющим безопасное и долговечное функционирование транспортной системы при невысоких скоростях движения юнимобилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка её воздействия на человека.
2. 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.
3. 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.
4. Гигиенический норматив Республики Беларусь «Показатели безопасности и безвредности вибрационного воздействия на человека», № 347 от 19.06.2021.
5. BS 6841:1987 Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock.
6. ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements.
7. ASCE ANSI/ASCE/T&DI 21-13. Automated People Mover Standards.
8. Mansfield N. J. and Maeda, S. 2005a. Comparison of subjective ratings of whole-body vibration for single and multi-axis vibration. 40th United Kingdom Conference on Human Response to Vibration, Marriot Hotel, Queen Square Liverpool.
9. web.archive.org/web/20150314224900. URL: <http://www.liftreport.de/index.php/news/176/368/Elevator-Ride-Quality>.