КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ 2019 Т. 11 № 2 С. 249–263

DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-249-263

УДК: 629.423.3

Моделирование движения рельсового экипажа в кривой в Simpack Rail

А. Э. Тарасов^а, Е. В. Сердобинцев

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

E-mail: a tarasov@invent-ing.de

Получено 03.09.2018, после доработки — 14.02.2019. Принято к публикации 18.02.2019.

В статье рассматривается определение одного из показателей динамических качеств (ПДК) железнодорожного подвижного состава — поперечного ускорения кузова — с использованием системы компьютерного моделирования динамики рельсовых экипажей Simpack Rail на комплексном уровне с переменной скоростью движения в графиковом режиме. Для этой цели использована ранее верифицированная с помощью средств кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ) модель секции типового грузового электровоза колеи 1520 мм. По этой причине вопросы, связанные с построением и проверкой модели электровоза в препроцессоре, в данной статье опускаются. Подробно описано моделирование железнодорожного пути на основе картографических эксплуатационных данных — плана, профиля и возвышения наружного рельса. Приводятся статистические параметры (моменты) выбранной геометрической неровности (источника возмущения) по каждой рельсовой нити, а также параметры плана и профиля выбранного для моделирования участка пути в виде графиков считанных файлов данных. Измерение непогашенного поперечного ускорения кузова производится с учетом горизонтальной составляющей от действия силы тяжести, что воспроизводит принцип работы реальных датчиков измерения ускорения со свободно расположенной массой. В заключение производится сравнение искомого ПДК, определенного по методу среднего значения абсолютного максимума из смоделированного нестационарного процесса со значением, полученным из экспериментальных данных. По результатам сравнения можно сделать вывол о том, что на данный показатель качества с внешней стороны прежде всего влияют скорость и геометрические характеристики рельсового пути, которые в данном случае были смоделированы в строгом соответствии с картографическими данными реального железнодорожного участка, где проводились испытания. Допущенные условности в модели транспортного средства — секции грузового электровоза (сосредоточение инерционно-массовых характеристик тел в центре их тяжести, малость перемещений между телами) — при соблюдении постоянства основных геометрических и упруго-диссипативных характеристик связей тел позволяют в Simpack Rail смоделировать поведение (отклики) системы с необходимой достоверностью.

Ключевые слова: комплексное моделирование, показатели динамических качеств, график движения, рельсовый экипаж, картографический путь, непогашенное ускорение

Работа выполнена при финансовой поддержке ООО «Тесис», г. Москва.

© 2019 Антон Эдуардович Тарасов, Евгений Васильевич Сердобинцев Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License. Чтобы получить текст лицензии, посетите вебсайт http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/ или отправьте письмо в Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

[Ки&М]

COMPUTER RESEARCH AND MODELING 2019 VOL. 11 NO. 2 P. 249–263

DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-249-263

UDC: 629.423.3

Simulation of rail vehicles ride in Simpack Rail on the curved track

A. E. Tarasov^a, E. V. Serdobintsev

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), 9/9 Obraszova st., Moscow, 127994, Russia

E-mail: ^a tarasov@inventing-ing.de

Received 03.09.2018, after completion — 14.02.2019. Accepted for publication 18.02.2019.

The paper studies the determination for one of the dynamic quality parameter (PDK) of railway vehicles car body lateral acceleration — by using of computer simulation system for railway vehicles dynamic Simpack Rail. This provide the complex simulation environment with variable velocity depending on the train schedule. The rail vehicle model of typical 1520 mm gauge fright locomotive section used for simulation has been verified by means of the chair "Electric multiple unit cars and locomotives" in the Russian University of Transport (RUT (MIIT)). Due to this homologation the questions of model creating and verification in preprocessor are excluded in this paper. The paper gives the detail description of cartographic track modeling in situation plane, heights plane and superelevation plane based on the real operating data. The statistic parameters (moments) for the rail related track excitation and used cartographic track data of the specified track section in this simulation are given as a numeric and graphical results of reading the prepared data files. The measurement of the car body residual lateral acceleration occur under consideration of the earth gravity acceleration part like the accelerometer measurement in the real world. Finally the desired quality parameter determined by simulation is compared with the same one given by a test drive. The calculation method in both cases is based on the middle value of the absolute maximums picked up within the nonstationary realizations of this parameter. Compared results confirm that this quality factor all the first depends on the velocity and track geometry properties. The simulation of the track in this application uses the strong conformity original track data of the test ride track section. The accepted simplification in the rail vehicle model of fright electric locomotive section (body properties related to the center of gravity, small displacements between the bodies) by keeping the geometric and force law characteristics of the force elements and constraints constant allow in Simpack Rail the simulation with necessary validity of system behavior (reactions).

Keywords: complex modeling, dynamic quality parameters, train schedule, railway vehicle, cartographic track, residual acceleration

Citation: Computer Research and Modeling, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 249–263 (Russian).

The work was supported by Tesis Ltd. Moscow.

[Ки&М]

1. Введение

Математическое моделирование сегодня широко распространено во всех областях инженерной и научной деятельности: появление новых программных комплексов с большим количеством возможностей требует более серьезной подготовки пользователей для их применения, а также ставит вопросы проверки правильности выполняемых ими расчетов, которые зачастую выполняются в фоновом режиме с помощью уже заложенных алгоритмов, не предназначенных для редактирования пользователями.

Математическому моделированию динамического поведения железнодорожного подвижного состава посвящено множество специальной литературы, исследования в этой области интенсивно ведутся с 30-х гг. прошлого столетия. Дифференциальные уравнения движения рельсовых экипажей позволили сформировать теоретические материалы математического аппарата, а с развитием вычислительных мощностей стало возможным его полноценное практическое применение. Сегодня в большинстве европейских стран моделирование движения железнодорожных экипажей является частью индустриального стандарта EN14363 [Testing and Simulation..., 2016], фундаментальное описание математического аппарата применяемого в данной статье программного комплекса Simpack Rail в части моделирования движения колесной пары по рельсовому пути дано в ряде публикаций немецкого союза инженеров VDI (Verband Deutscher Ingenieure) [Netter, 1998]. Разработка критериев оценки соответствия результатов моделирования и валидация компьютерных моделей, в том числе по поиску уточняющих решений в зоне контакта «колесо/рельс», нашли свое продолжение в совместных работах швейцарских и немецких инженеров [Polach, Böttcher, 2013].

В данной публикации обобщен опыт большого количества работ по использованию компьютерного моделирования для определения сертификационных показателей железнодорожного подвижного состава — сил воздействия на путь и колесную пару, сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными [Jönsson et al., 2008], истории вопроса верификации метрических динамических систем с помощью компьютерного моделирования [Schwer, 2007], а также перспектив развития компьютерного моделирования железнодорожного транспорта [Evans, Berg, 2009]. Современное состояние применения моделирования динамики рельсовых экипажей при их проектировании в англоязычной литературе также описано в другой известной международной публикации по технологиям железнодорожного транспорта [Polach, Evans, 2014]. В целом все вышеперечисленные работы посвящены решению одной задачи — сокращению затрат при проектировании, проверке (верификации) и сертификации железнодорожного подвижного состава путем замещения части натурных испытаний моделированием. На основе полученного собственного опыта и анализа существующей научной базы авторы демонстрируют использование компьютерного метода для статистически надежного определения сертификационного показателя модели современного электровоза с попыткой приближения к реальным условиям нестационарности. Здесь необходимо отметить, что, несмотря на огромное количество работ, критерию приближения моделирования рельсовых экипажей к нестационарным условиям, которые в действительности имеют место при его эксплуатации в естественной среде, значение уделяется недостаточное. Ранее это было связано с относительной малостью вычислительных мошностей (первые программные комплексы на IBM PC 386/486 с операционной системы DOS позволяли реализовать время моделирования в несколько секунд, поэтому результаты исследования нельзя было считать нестационарными ввиду малой длительности получаемых реализаций процессов). Сегодня математическое моделирование в Simpack Rail позволяет получить необходимые данные такого качества для их статистической обработки при правильном использовании этого инструмента.

Бурное развитие промышленности также оправдывает использование таких инструментов, но только в том случае, если корректность их работы может быть доказана какими-либо понятными методиками.

Авторы статьи имеют многолетний опыт исследования, конструирования и расчетов механической части железнодорожного подвижного состава. С целью привлечения внимания к новым технологиям и возможностям, которые предоставляет программная индустрия для динамических расчетов в этой области, а также повышения доступности информации о современных трендах железнодорожного машиностроения, была проведена большая работа по созданию, тестированию, отладке и проверке математических моделей локомотивов с использованием немецкого программного комплекса Simpack Rail, позволяющая получать необходимые для дальнейших исследований показатели, на основании которых можно оценивать динамические качества создаваемых продуктов, без дорогостоящих натурных испытаний.

В предыдущих публикациях авторами были рассмотрены свободные колебания рельсовых экипажей на прямых участках пути без возмущений [Сердобинцев, Тарасов, 2017]. Эти работы дали возможность показать применимость методики проверки правильности машинного синтеза уравнений с помощью свободных колебаний системы, получившей единичное возмущение, для моделей с большим числом степеней свободы.

Далее было необходимо проверить динамическую систему локомотива — объект из многих тел с сосредоточенными массами и упругими и диссипативными связями — на правильность построения на верхнем уровне, чтобы убедиться в правильности построения всей модели в целом [Сердобинцев, Тарасов, 2018].

В данной статье читателю предлагается ознакомиться с практическим использованием проверенной и отлаженной многомассовой модели локомотива для моделирования его нестационарного движения с переменной скоростью движения, использования исходных реальных данных состояния пути по конкретному участку реальной длины и получения, таким образом, численным путем кривой нестационарного случайного процесса поперечного ускорения кузова — основного показателя, влияющего на комфорт в пути следования. Учет графикового профиля скорости на основе записей реальных скоростемерных лент и обработка данных плана и профиля пути участка протяженностью почти 19 километров потребовали большого количества вычислительных ресурсов, которые удалось высвободить путем ограничения степени детализации модели секции электровоза. В известной авторам практике зачастую стремятся создать максимально точную модель, ограничиваясь при этом простейшими стационарными вариантами моделирования ее движения. Авторы попытались изменить этот принцип, сделав упор на детализацию и достаточный объем инфраструктуры механической системы, с которой взаимодействует модель, что является относительно новым подходом. Приводятся математическое описание модели пути, необходимых параметров исходных данных, методика оценки полученных результатов.

Статья будет полезна инженерным и научно-техническим работникам, связанным с проектированием и испытаниями тягового железнодорожного подвижного состава, а также всем интересующимся динамикой железнодорожного транспорта.

2. Математическое описание картографического пути

Реальное движение железнодорожного транспорта является возмущенным, так как фактический путь не является идеальным и прямым. Для моделирования возмущенного движения с условиями, приближенными к реальным, в Simpack Rail существует возможность задания параметров пути на основе картографических данных.

Картографический путь задается параметрами в трех плоскостях: планом, продольным профилем и поперечным профилем. На рис. 1 представлен отрезок условного пути.

В этих трех плоскостях полностью определены положение и ориентация в пространстве соответствующего поперечного сечения A с находящимися в нем левой и правой рельсовыми нитями, двигающегося по нормали к пространственной оси пути k_s вдоль этой оси на протяжении трассы s.



Рис. 1. Описание пути в пространстве в инерциальной системе отсчета модели e_I : $xe_I y$ — плоскость плана пути; $xe_I z$ — плоскость продольного профиля пути; $ye_I z$ — плоскость поперечного профиля пути; k_s — ось пути в трехмерном пространстве; k_h — проекция оси пути на горизонтальную плоскость $xe_I y$; s — пройденное расстояние по оси пути в трехмерном пространстве; \overline{s} — проекция пройденное поперечное сечение оси пути на горизонтальную плоскость $xe_I y$; A — мгновенное поперечное сечение оси пути

2.1. План пути

План пути описывает направление горизонтальной оси пути k_h (т. е. проекции пройденного расстояния по пространственной оси пути k_s на горизонтальную плоскость $xe_I y$), обозначенной как \overline{s} . Числовым параметром плана пути является горизонтальная кривизна k_h .

Для описания пути в плане в данной работе использованы следующие элементы:

- прямая линия $(k_H = 0)$,
- круговая кривая $\left(k_H = k_{H_0} = \frac{1}{R_{H_0}} = \text{const}\right),$
- клотоида (k_H ∈ (0, k_{H₀})) плоская переходная кривая между двумя смежными участками.

2.2. Продольный профиль пути

Продольный профиль пути описывается градиентом tg $\gamma_{hs} = \frac{dz_{hs,h}}{d\overline{s}}$ местности (подъемы или спуски) оси пути k_s вдоль горизонтальной оси пути k_h , т. е. высотой местности по отношению к развернутому плану пути. Его определяет проекция пространственной оси k_s на плоскость xe_Iz , градиент которой задается вертикальной кривизной k_v (рис. 2).

Здесь возможны следующие варианты:

- 1) горизонтальный участок ($k_v = 0$, $\gamma_{hs} = 0$),
- 2) наклонный участок ($k_v = 0, \ \gamma_{hs} \neq 0$),
- 3) переходной участок продольного профиля ($k_v = k_{v0} = \text{const}, \gamma_{hs} \neq 0$).



Рис. 2. Геометрические соотношения между параметрами профиля пути в развернутом виде (пространственная ось пути k_s при этом вырождается в плоскую кривую): ds — касательная в точке мгновенного поперечного сечения к оси пути; γ_{hs} — угол между касательной к проекции оси пути на плоскость xe_1z и горизонтальной осью x; $d\overline{s}$ — приращение пройденного расстояния по оси пути в проекции на горизонтальную плоскость xe_1y ; $dz_{hs,h}$ — приращение пройденного расстояния по оси пути в проекции на вертикальную плоскость ye_1z

2.3. Поперечный профиль пути

Поперечный профиль пути описывает возвышение наружной рельсовой нити (рельсовой нити большего радиуса) в кривых участках пути в сечении A над горизонтальным уровнем по отношению к внутренней рельсовой нити, т. е. в плоскости, перпендикулярной пространственной оси пути k_s (рис. 3). Параметром является уровень возвышения u.

На железнодорожном транспорте Российской Федерации отсчет возвышения наружного рельса производится относительно внутреннего рельса, а не оси пути.



Рис. 3. Переход между двумя различными возвышениями наружной рельсовой нити u_1 и u_2 при наблюдении из подвижной системы координат e_s и отсчете возвышения наружного рельса относительно оси пути: k_s — ось пути в трехмерном пространстве; k_T — ось пути в трехмерном пространстве с учетом возвышения наружной рельсовой нити; γ_{sT} — угол наклона оси пути k_T при изменении возвышения наружной рельсовой нити; e_0 — ширина колеи (расстояние между внутренними гранями головок рельсов); *s* — направление движения

Здесь возможные следующие варианты:

1) отсутствие возвышения (u = 0),

2) полное возвышение ($u = u_0 = \text{const}$),

3) переходное возвышение $(u \in (0, u_0))$.

Длина дуги проекции оси пути на горизонтальную плоскость \overline{s} является переменной всех трех параметров картографического пути: $k_h(\overline{s})$, $k_v(\overline{s})$ и $u(\overline{s})$.

2.4. Параметры пути, выбранные для моделирования

Несмотря на то что каждый из вышеописанных параметров в Simpack Rail может быть задан независимо от другого, с учетом реальной конструкции пути длины участков, имеющих возвышение наружного рельса, при проведении данной работы были равны длинам круговых и переходных кривых, а длины переходных кривых взяты равными 100 м ввиду моделирования движения локомотива на участке со скоростью обращения грузовых поездов не более 80 км/ч. В качестве прототипа был взят один из перегонов (общей протяженностью 20 км) главного хода Транссибирской магистрали. Картографический план данного участка в Simpack Rail представлен на рис. 4.

Возвышение наружного рельса линейно возрастает от 0 до u на протяжении переходной кривой: это самый распространенный способ моделирования поперечного профиля пути. Для повышения достоверности результатов компьютерного исследования программный комплекс Simpack Rail позволяет моделировать данный параметр также с помощью переходных кривых возвышения, однако для его реализации необходимы подробные данные о состоянии пути по записям путеизмерительного вагона, возможность получения которых отсутствовала.





_2019, T. 11, № 2, C. 249–263 _

На основании данных записей путеизмерительного вагона, работающего на участке, взятом в качестве прототипа для моделирования пути, возвышение наружного рельса определялось радиусом кривой, что соответствует реальным условиям содержания железнодорожного пути. Параметры возвышения приведены в таблице 1.

На рис. 5 представлены зависимости радиусов кривых в плане на выбранном перегоне.

На рис. 6 представлены зависимости возвышения наружного рельса на выбранном перегоне от длины участка.

Радиус кривой, м	Возвышение, мм	Радиус кривой, м	Возвышение, мм
400–500	150	900-1500	65
500-700	115	1500-2500	35
700–900	90	более 2500	20

Таблица 1. Принятые в модели возвышения наружного рельса







КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Переход от нулевого возвышения наружного рельса к максимальному в соответствующей кривой ($u \in (0, u_0)$) выполнялся по линейной зависимости.

Для моделирования возмущенного движения использована геометрическая неровность раздельно для левой и правой рельсовых нитей, полученная путем записи и обработки реальной неровности магистрального участка рельсового пути протяженностью 5 км (10 000 точек замера через каждые 0,5 м). С целью использования записи неровности для участка длиной 20 км произведена ее четырехкратная стыковка с условием, что максимальная разность значений в зоне стыковки не превышает максимальной разности значений внутри записанной неровности; это позволяет гарантировать непрерывное интегрирование модели. Это упрощение, учитывая, что скорость движения модели переменная, не нарушает нестационарности моделируемых процессов.

Изображение неровности после считывания бинарного файла данных представлено на рис. 7.

Статистические параметры [Савоськин и др., 1990] неровности приведены в таблице 2.



Рис. 7. Горизонтальные неровности левой (а) и правой (б) рельсовых нитей моделируемого участка пути

Параметр	Обозначение	Левая неровность	Правая неровность
Мат. ожидание	$\overline{x_i}$, M	4.801E-09	1.191E-07
Дисперсия	$S_{x_i}^2$, m ²	6.602E-06	5.833E-06
Норм. момент 3-го порядка	$\mu_3(x_i) / \sigma_{x_i}^3$	0.219	0.181
Норм. момент 4-го порядка	$\mu_4(x_i) / \sigma_{x_i}^4$	5.552	5.664

Таблица 2. Статистические параметры возмущения модели пути

3. Модель

В качестве подвижного состава в данной работе использована симметричная пространственная модель с шестью степенями свободы и параметрами типового грузового электровоза, проверенная и верифицированная путем численной оценки симметрии отклика системы при единичном симметричном возмущении, а также путем сравнения с результатами моделирования свободных колебаний в комплекте программ кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ) [Сердобинцев, Тарасов, 2017; Тарасов, 2018].

4. Экстремальные значения случайных процессов

Основой для развития методик определения статистически надежных экстремальных значений динамических нагрузок послужили исследования выбросов случайных процессов. Они выполняются начиная с 40-х годов XX века. За это время появились фундаментальные работы С. О. Райса, В. И. Тихонова, Р. Л. Стратановича, Г. Крамера, М. Литбеттера, Э. Гумбеля, Ю. К. Беляева, В. Т. Горяинова, Д. Слепяна, В. В. Болотина, А. Я. Фомина и других отечественных и зарубежных авторов.

Применение элементов теории выбросов к исследованию экстремальных значений случайных процессов с целью возможности прогнозирования на длительные (эксплуатационные) отрезки времени движения случайного характера абсолютных максимумов (а. м.) динамических процессов, происходящих в механической части подвижного состава, нашло применение в работах А. К. Шафрановского, А. М. Бржезовского, Л. А. Львова, А. Н. Савоськина, Г. П. Бурчака, Е. В. Сердобинцева и других.

Среди отечественных работ данной тематики следует выделить исследования, проведенные на базе значительного объема экспериментальных данных отделением вагонного хозяйства ВНИИЖТа [Франц, 1982], а среди зарубежных — Институтом транспортной техники Технического университета г. Берлина для вагонов метрополитена [Bugarcic, 1989].

В первом случае был рассмотрен вопрос об использовании распределений а. м. при решении задач оценки ходовых качеств вагонов по значениям ускорений и коэффициентов динамики, а также надежности несущих деталей вагонов при внезапных отказах. Исследования были выполнены исходя из допущения о стационарности условий динамических процессов (постоянные скорости движения). В данной работе, учитывая отсутствие единой терминологии для различного рода экстремумов случайных процессов в литературе по теории выбросов случайных процессов, а также в работах, затрагивающих вопросы статистической динамики подвижного состава, автор подробно описал понятие абсолютных и локальных максимумов. Поэтому в настоящей статье в дальнейшем будет применяться данная терминология, проиллюстрированная на примере реализации случайного процесса, изображенного на рис. 8.



Рис. 8. Пример реализации динамического процесса $\sigma(t)$: $\sigma(tmx_5)$ — абсолютный максимум выбранной реализации; $\sigma(tmx_1)$, $\sigma(tmx_2)$, $\sigma(tmx_3)$, $\sigma(tmx_4)$, $\sigma(tmx_6)$, $\sigma(tmx_7)$ — локальные максимумы выбранной реализации; $\sigma(tmn_7)$ — абсолютный минимум выбранной реализации; $\sigma(tmn_1)$, $\sigma(tmn_2)$, $\sigma(tmn_3)$, $\sigma(tmn_4)$, $\sigma(tmn_5)$, $\sigma(tmn_6)$ — локальные минимумы выбранной реализации

Процесс $\sigma(t)$ принимает максимальное значение *h* в моменты времени, когда $\sigma'(t) = 0$ и в окрестностях этой точки $\sigma'(t < t_e) > 0$, а $\sigma'(t > t_e) < 0$. Согласно Райсу, точка $\sigma(t_e)$ называется максимумом [Rice, 2011]. На рис. 8 это точки $\sigma(tmx_1) \dots \sigma(tmx_7)$. Аналогичное определение можно дать для минимумов (точки $\sigma(tmn_1) \dots \sigma(tmn_7)$) на рис. 8). Наибольшие экстремумы (наибольшие значения процесса) за время τ , согласно [Тихонов, 1970], называются абсолютными. На рис. 8 максимум процесса в точке tmx_5 и минимум в точке tmn_7 являются абсолютными. Максимумы и минимумы между положительным пересечением (снизу вверх) и ближайшим (в сторону увеличения t) отрицательным пересечением процесса уровня математического ожидания μ называются локальными экстремумами или амплитудами. На рис. 8 это точки tmx_2 , tmx_3 , tmx_7 , tmn_1 , tmn_4 , tmn_7 .

5. Оценка результатов моделирования

Для оценки результатов моделирования движения в кривых участках пути использован показатель поперечного ускорения под первым шкворнем кузова электровоза. Датчик ускорения в Simpack Rail необходимо сконфигурировать таким образом, чтобы учитывалось ускорение, сообщаемое силой тяжести (рис. 9) [SIMPACK Documentation..., 2013].

Это необходимо сделать для того, чтобы зарегистрировать так называемое непогашенное или остаточное ускорение, которое по модулю представляет собой разность между горизонтальной составляющей ускорения от действия центробежной силы при движении в кривой и горизонтальной составляющей от силы тяжести. На рис. 9 показано, что результирующее значение непогашенного ускорения зависит от трех параметров: скорости движения поезда v, радиуса кривой R и угла наклона продольной плоскости кузова φ_x . Из рис. 3 нетрудно увидеть, что

$$\varphi_x = \arcsin\frac{u}{e_0}.$$
 (1)

Поэтому при измерении непогашенного поперечного ускорения конфигурация пути оказывает значительное влияние на результат, что предъявляет повышенные требования к точности картографических данных того или иного участка при его моделировании. Наибольшего соответствия можно добиться при проведении путеизмерительных проверок до и после испытаний, а затем использования в модели усредненных данных по параметрам пути. Однако на практике получить такие данные чаще всего невозможно, поэтому приходится пользоваться данными нормативов и инструкций, устанавливающих требования к идеальному состоянию пути.



Рис. 9. Расчет непогашенного ускорения кузова локомотива: a_t — проекция на горизонтальную ось составляющей ускорения от центробежной силы v^2 / R ; g — ускорение, сообщаемое кузову силой тяжести; φ_x — угол наклона кузова в кривых участках пути (участках с возвышением наружного рельса); $g \sin \varphi_x$ — горизонтальная составляющая от ускорения, сообщаемого кузову силой тяжести при его наклоне; a_q — результирующее непогашенное ускорение

С учетом всех трех вышеназванных параметров непогашенное ускорение определяется по формуле

$$a_q = \frac{v^2}{R} \cos \varphi_x - g \sin \varphi_x, \tag{2}$$

где *v* — скорость движения, м/с; *R* — радиус кривой, м; φ_x — угол боковой качки кузова, рад.

Из рис. 9 видно, что возвышение наружного рельса определяет длину и направление вектора горизонтальной составляющей от силы тяжести, а следовательно, наряду со скоростью движения и радиусом кривой, величину результирующего непогашенного ускорения. [Бирюков и др., 2013]. Поэтому расчет возвышения наружного рельса в соответствии с инструкцией по текущему содержанию железнодорожного пути производят с учетом всех трех параметров [Инструкция по текущему содержанию..., 2008].

В зависимости от конкретных условий работы пути в кривой (интенсивности износа рельсов по одной и другой нитям) полученная расчетом величина возвышения при необходимости может корректироваться в пределах нормативов непогашенных ускорений.

На рис. 10, *а* представлены результаты замера непогашенного поперечного ускорения, зарегистрированные виртуальным сенсором ускорений в модели Simpack Rail, при ее движении с переменной скоростью в графиковом режиме по участку пути с параметрами, описанными выше. На рис. 10, δ приведены записи реального датчика поперечного ускорения, установленного также на кузове под центром первой тележки по ходу движения на локомотиве, имеющем близкие массово-инерционные характеристики. Профиль изменения скорости для модели взят из записи скоростемерной ленты данного локомотива. Поэтому кривая скорости в обоих случаях идентичная. Движение электровоза производилось по тому же участку Транссибирской магистрали, план и продольный профиль которого были приняты для моделирования. Поперечный профиль смоделированного пути (фактическое состояние рельсовых нитей на момент проведения испытаний на реальном локомотиве) и примененное возмущение не являются оригинальными, так как отсутствовала возможность получения этих данных.



Рис. 10. Поперечное ускорение кузова локомотива: по результатам моделирования (а); по результатам испытаний (б)

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для количественной оценки данного параметра, как показателя динамического качества (ПДК) локомотива, используется максимальное поперечное ускорение 1-го шкворня кузова, которое может быть определено как среднее значение абсолютного максимума [Крушев и др., 2012] по формуле

$$a_{a\max} = \bar{H}_{a}.$$
 (3)

Для этой цели полученные зависимости $a_q(t)$ разбивают на 30-секундные реализации, в каждой реализации находят абсолютный максимум [Франц, 1982] и усредняют все полученные таким образом экстремальные значения.

На рис. 11 представлено графическое изображение данной обработки.



Номер абсолютного максимума

Рис. 11. Средние значения абсолютного максимума поперечного ускорения 1-го шкворня кузова локомотива: по результатам испытаний (сплошная кривая); по результатам моделирования (штриховая кривая)

6. Заключение

Непогашенное поперечное ускорение определяет плавность хода в переходных режимах движения и является одним из показателей качества механической части рельсовых экипажей.

Действующие на железнодорожном транспорте нормативы устанавливают места его измерения под первым и вторым шкворнями (центрами поперечого вращения) тележек локомотива на полу кузова. Испытания, проводимые для натурного его определения, требуют дорогостоящей подготовки и наличия реального локомотива.

С помощью виртуальной модели, созданной с помощью компьютерного моделирования, значительно удешевляется получение таких данных, необходимых для дальнейшей обработки. Вместе с тем, как отмечено во введении, работа модулей решателей (солверов) происходит в фоновом (закрытом) режиме, для проверки моделей необходимо использовать методики, основанные на анализе результатов.

Для обработки результатов возмущенного движения с большим временем моделирования авторы использовали методику средних значений абсолютных максимумов, которая при анализе экспериментальных данных наиболее полно объяснена в работе обобщения результатов многолетних статистических наблюдений Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта [Франц, 1982]. Понятие абсолютного максимума раскрыто в § 4 данной статьи. Примененная методика сравнения смоделированного и зарегистрированного при испытаниях значений a_q с максимально возможным учетом имеющихся ограничений при приближении условий моделирования к реальным показала следующий результат:

- по итогам испытаний: $a_{q \max} = 0.411 \text{ м/c}^2$,
- при моделировании: $a_{q \max} = 0.419 \text{ м/c}^2$,
- при нормативном максимально допустимом значении в 0.7 м/c².

Как правило, математическое моделирование лишь приближенно отражает реальные нестационарные условия эксперимента, поскольку учесть все реально влияющие на движение факторы (в том числе погодные условия, неравномерность жесткости пути из-за различного его состояния по условиям содержания и др.) не удается.

Но реальные диапазоны моделируемых величин не могут значительно отличатся от полученных в ходе эксперимента, если модель построена верно. Использование методики оценки по среднему значению абсолютного максимума как для экспериментальных, так и для смоделированных данных позволяет более точно учесть случайный характер динамических процессов, происходящих в механической части подвижного состава, и рекомендуется к применению как критерий, позволяющий получить с помощью моделирования статистически верные экстремальные значения показателей динамических качеств для их дальнейшего использования в расчетах прочности проектируемого подвижного состава.

Авторы надеются, что данный обзор вместе с работами, обозначенными во введении, даст возможность читателю получить полноценный пример построения, моделирования и оценки результатов динамических качеств железнодорожного подвижного состава с использованием пакета многомассовой динамики Simpack Rail.

Список литературы (References)

Бирюков И. В. Механическая часть тягового подвижного состава: учебник для вузов ж.-д. трансп. / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак и др., под ред. И. В. Бирюкова / Репринтное воспроизведение издания 1992 г. — М.: Альянс, 2013.

Birijukov I. V. Mekhanicheskaya chasť tyagovogo podvizhnogo sostava: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp. [Mechanical part of railway vehicles. Book for high schools] / I. V. Birijukov, A. N. Savos'kin, G. P. Burchak i dr., pod red. I. V. Birijukova / Reprintnoe vosproizvedenie izdaniya 1992 g. — Moscow: Al'yans, 2013 (in Russian).

- Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути, утвержденная МПС РФ № ЦП-744, редакция от 21.01.2008 // [Электронный ресурс] / ООО Трудовой десант. СПб., 2018. URL: http://www.tdesant.ru/info/item/6 (дата обращения: 20.06.2018). Instruktsiya po tekushchemu soderzhaniyu zheleznodorozhnogo puti, utverzhdennaya MPS RF Nr. TSP-744, redaktsiya ot 21.01.2008 [Current maintenance instruction for railway track, approved by Transport ministry of Russian Federation Nr. 744, edition 21.01.2008] // ООО Trudovoi desant. SPb., 2018. Available at: URL: http://www.tdesant.ru/info/item/6 (accessed: 20.06.2018).
- Крушев С. Д., Сердобинцев Е. В., Званцев П. Н. Исследование свободных и вынужденных колебаний моделей подвижного состава: учеб. пособие. — М.: МИИТ, 2012. *Kruschew S. D., Serdobintsev E. V., Zvantsew P. N.* Issledovanie svobodnykh i vynuzhdennykh kolebanii modelei podvizhnogo sostava: ucheb. posobie [Investigation of free and forced oscillations of railway vehicles models]. — Moscow: MIIT, 2012 (in Russian).
- Савоськин А. Н. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак, А. П. Матвеевичев и др., под ред. А. Н. Савоськина. М.: Машиностроение, 1990.

Savos'kin A. N. Prochnost' i bezotkaznost' podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Durability and reliability of railway vehicles] / A. N. Savos'kin, G. P. Burchak, A. P. Matveevichew., pod red. A. N. Savos'kina. — Moscow: Mashinostroenie, 1990 (in Russian).

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ _

Сердобинцев Е. В., Тарасов А. Э. Верификация пространственных динамических моделей рельсовых экипажей в SIMPACK RAIL при исследовании горизонтальных колебаний локомотивов // Транспорт Урала. — 2017. — № 4 (55). — С. 3–9. Serdobintsev E. V., Tarasov A. E. Verifikatsiya prostranstvennykh dinamicheskikh modelei rel'sovykh ekipazhei v SIMPACK RAIL pri issledovanji gorizontal vkh kolebanji lokomotivov [Verification of spatial dynamic models of

v SIMPACK RAIL pri issledovanii gorizontal'nykh kolebanii lokomotivov [Verification of spatial dynamic models of railway vehicles in SIMPACK RAIL in the study of horizontal oscillations of locomotives] / Transport of the Urals. — 2017. — No. 4 (55). — P. 3–9 (in Russian).

Тарасов А. Э. Отладка и проверка пространственных динамических моделей локомотивов в Simpack Rail на верхнем уровне // Инновационный транспорт. — 2018. — № 1 (27). — С. 67–75.

Tarasov A. E. Otladka i proverka prostranstvennykh dinamicheskikh modelei lokomotivov v Simpack Rail na verkhnem urovne [Debugging and testing of spatial dynamic locomotive models in Simpack Rail at the top level] / Innotrans. — 2018. — No. 4 (55). — P. 67–75 (in Russian).

- Тихонов В. И. Выбросы случайных процессов. М.: Наука, 1970. *Tikhonov V. I.* Vybrosy sluchainykh protsessov [Overshooting of stochastic processes]. — Moscow: Nauka, 1970 (in Russian).
- Франц В. В. Оценка динамических и прочностных качеств ходовой части вагонов на основе распределений абсолютных максимумов: дис. канд. техн. наук: 05.22.07. МПС-СССР ВНИИЖТ. М.: МИИТ, 1982.

Franz V. V. Otsenka dinamicheskikh i prochnostnykh kachestv khodovoi chasti vagonov na osnove raspredelenii absolyutnykh maksimumov: dis. kand. tech. nauk: 05.22.07 [Evaluation of running and structural behavior of fright cars undercarriages on the base of absolute maximums distributions: PhD technical master work: 05.22.07]. — MPS-SSSR VNIIZhT. — Moscow: MIIT, 1982 (in Russian).

- Bugarcic H., Breznovsky M., Kasten P. Experimentelle Erfassung der für die Festigkeitsauslegung von Stadtverkehrs-Schienenfahrzeugen repräsentativen laufdynamischen Rechenparameter. Abschlussbericht zu Forschungsvorhaben des Bundesministers für Verkehr Auftrags-Nr. 70211/87 / [Experimental registration of running dynamic calculate parameters representatives for the local city railway transport]. — Juli 1989. — 558 S.
- *DIN EN 14363:2016.* Railway applications Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles Running Behavior and stationary tests, ICS 45.060.01, October 2016.
- *Evans J., Berg M.* Challenges in simulation of rail vehicle dynamics // Vehicle System Dynamics. Vol. 47. 2009.
- Jönnson L.-O., Nilstam N., Persson I. Using simulations for approval of railway vehicles: a comparison between measured and simulated track forces // Vehicle System Dynamics. Suppl. Vol. 46. 2008.
- *Netter H.* Rad-Schiene-Systeme in differential-algebraischer Darstellung. Fortschr.-Ber. [Rail-wheel systems in differential-algebraic representation. Reports of progress] // VDI Reihe 12 Nr. 352. Düsseldorf, 1998. 152 p.
- Polach O., Böttcher A. A new approach to define criteria for rail vehicle model validation // 23rd International Symposium of Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. — Qingdao, China, August 19–23, 2013. — Paper No. 2.2 (Id278).
- Polach O., Evans J. Simulations of Running Dynamics for Vehicle Acceptance: Application and Validation // International Journal of Railway Technology. — April 2014.
- *Rice S. O.* Mathematical analysis of random noise // Bell System Technical Journal. Bell Labs. Vol. 23 (3). P. 282–332. Retrieved June 26, 2011.
- Schwer L. E. Validation metrics for response histories: perspectives and case studies // Engineering with Computers. 2007. Vol. 23. P. 295–309. London: Springer-Verlag.
- SIMPACK Documentation. Release 9.5. Copyright by SIMPACK AG, 2013.