

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БЕЗОПАСНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Надано опис можливостей розробленого обчислювального комплексу та його використання для розв'язання задач безпеки і стійкості руху.

Дано описание возможностей разработанного вычислительного комплекса и его использование для решения задач безопасности и устойчивости движения.

The description of the developed computer system possibilities and its use to solve problems of motion safety and stability is given.

Последние десятилетия характерны существенным повышением скоростей движения пассажирских поездов масс и длин грузовых поездов, в том числе таких, у которых локомотивы оказываются распределенными вдоль состава. Несмотря на внедрение систем автоведения и диагностики, в процессе движения, состояния ходовых и других наиболее важных частей подвижного состава, систем передачи управляющих сигналов с головного локомотива на удаленные от него вспомогательные локомотивы, автономных систем управления вспомогательными локомотивами, продолжают иметь место инциденты, связанные со сходом с колеи вагонов пассажирских и особенно грузовых поездов.

В процессе поиска причин этих инцидентов желательно использовать не только экспертные оценки специалистов, результаты лабораторных металловедческих анализов, но и методы математического моделирования движения рассматриваемого поезда. При моделировании движения поезда как многомассовой, существенно нелинейной механической системы могут быть получены осциллограммы продольных усилий в упряжи, перемещения и ускорения отдельных узлов вагонов или локомотивов, а также действующие на них силы в процессе их пространственных колебаний. В данном случае основная цель моделирования состоит в определении количественных значений показателей, характеризующих безопасность движения, динамические качества вагонов и сравнение их с допускаемыми. При этом заключение о причине произошедшего инцидента становится более объективным и научно обоснованным.

Разработанные нами расчетные схемы, модели и в целом программный комплекс применяются и в научных целях при решении прикладных задач например, о выборе траектории движения поезда, обеспечивающей условия безопасного движения и минимальный расход энергии на тягу, о построении режимных карт ведения поезда, о составлении новых Норм проектирования продольного профиля железнодорожного пути и т. д.

Использование при этом методов объектно-ориентированного программирования и современной вычислительной техники позволяют решать задачу о пространственных колебаниях локомотивов и вагонов поезда, движущегося по имеющему неровности железнодорожному пути криволинейному в плане и профиле. Эти колебания сопровождаются действием на каждый экипаж продольных сил, вызванных переходными или стационарными режимами движения поезда, которые обусловлены влиянием управляющих воздействий, переломами продольного профиля пути и его криволинейности в плане.

Расчеты чаще всего выполняются для реальных участков пути (продольный профиль и план), реального поезда с учетом всех его параметров (массы и тяговые характеристики локомотивов, характеристики вагонов, силовые характеристики междувагонных соединений, характеристики тормозных систем и т.п.), а также с учетом заданных или задаваемых скоростей движения и режимов управления. Численные значения параметров, характеризующих работу тех или иных тормозных систем, междувагонных соединений и систем управления тягой принимаются по результатам многолетних, многочисленных экспериментальных опытов, проведенных с поездами в реальных усло-

виях опытного кольца ВНИИЖТа (Москва) и ряда железных дорог Украины и России. При этом в рассматриваемом поезде могут находиться локомотивы и вагоны разных типов, а сами вагоны могут быть оборудованы поглощающими аппаратами разных типов.

Задача о продольных колебаниях поезда решается следующим образом. В качестве расчетной схемы используется одномерная цепочка тел (экипажей), соединенных между собой существенно нелинейными деформируемыми элементами, учитывающими наличие зазоров в упряжи. Движение экипажа описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{V}_j = \frac{S_j + Fb_j + Wo_j + Wi_j + FFt}{m_j}, \\ \dot{x}_j = V_j \end{cases},$$

где S_j – продольная сила, действующая в j -ой связи, Fb_j – тормозная сила, действующая на j -й экипаж, Wo_j – сила основного сопротивления поступательному движению поезда для j -го экипажа, Wi_j – сила сопротивления от профиля пути для j -го экипажа, FFt – сила тяги или сила, вызванная электрическим торможением, x_j, V_j, \dot{V}_j – соответственно пройденный путь, скорость и ускорение j -го экипажа.

Указанная система дифференциальных уравнений решается с использованием численных методов интегрирования, которые выбраны с учетом особенностей дифференциальных уравнений и получаемых решений [1; 2]. В предлагаемом вычислительном комплексе в зависимости от решаемых задач возможно использование как метода Адамса-Башфорта-Мильтона

- прогноз:

$$p_{k+1} = y_k + \frac{h}{2}(3 \cdot \dot{y}_k - \dot{y}_{k-1});$$

- коррекция:

$$y_{k+1} = y_k + \frac{h}{2}(\dot{p}_{k+1} + \dot{y}_k),$$

так и метода Хемминга

- прогноз:

$$p_{k+1} = y_{k-3} + \frac{4 \cdot h}{3}(2\dot{y}_{k-2} - \dot{y}_{k-2} + 2\dot{y}_k);$$

- модификация:

$$m_{k+1} = p_{k+1} - \frac{112}{121}(p_k - c_k);$$

- коррекция:

$$c_{k+1} = \frac{9y - y_{k-2}}{8} + \frac{3h}{8}(-\dot{y}_{k-1} + 2\dot{y}_k + \dot{m}_{k+1});$$

- окончательное решение:

$$y_{k+1} = c_{k+1} + \frac{9}{121}(p_{k+1} - c_{k+1}).$$

Приведенные формулы относятся к группе сильно устойчивых разностных формул [3]. Применение именно сильно устойчивых формул вызвано спецификой тех задач, решение которых требуется рассматривать на довольно длинных отрезках интегрирования.

Разработанный программный комплекс позволяет моделировать движения различных поездов, характеристики которых находятся в базе данных о поездах. Таблица исходных данных имеет поля, в которых задается следующая информация (табл. 1).

Таблица 1

База данных для поездов

Название поля	Содержащая информация
Экипаж	Тип экипажа(грузовой, пассажирский, тип локомотива)
Вес	Вес
Длина	Длина
Осей	Количество осей
Колодки	Тип тормозных колодок (чугунные или композиционные)
Режим воздухораспределителя	Включенный режим воздухораспределителя (груженный, средний или порожний)
Нажатие	Одностороннее или двухстороннее
Подшипники	Качения или скольжения
Зазор	Величина зазора в межвагонном соединении
Аппарат	Тип поглощающего аппарата межвагонного соединения

Количество строк в таблице соответствует количеству экипажей.

При формировании поездов предусмотрена возможность моделирования движения соединенных поездов с расположением локомотивов

вдоль состава. Полагается, что все локомотивы должны быть одного типа.

Как известно, величины продольных усилий S_j – зависят от величины относительных продольных перемещений (x_j) соседних экипажей q_j и скорости \dot{q}_j , которые определяются следующим образом:

$$\begin{cases} q_j = x_j - x_{j+1} \\ \dot{q}_j = V_j - V_{j+1}. \end{cases}$$

В случае оборудования межвагонного соединения одинаковыми поглощающими аппаратами автосцепки для определения продольных сил используется метод, описанный в [1; 4]. Если в межвагонном соединении оказываются аппараты с отличающимися между собой характеристиками, то продольное усилие определяется из следующего условия:

$$\begin{cases} S_j^n = S_j^3 = S_j \\ q_j^n + q_j^3 = q_j, \end{cases}$$

где S_j^n и S_j^3 – значения продольных усилий в переднем и заднем поглощающих аппаратах соответственно; q_j^n и q_j^3 – деформации соответствующих поглощающих аппаратах.

При моделировании тормозных процессов, происходящих в поездах, учитывается, что в зависимости от типа экипажа возможны различные типы торможений: пневматическое (грузовые и пассажирские вагоны), электропневматическое (пассажирские вагоны), электрическое (локомотивы), а также торможение, вызванное аварийным режимом – разрыв тормозной магистрали. При этом предполагается, что тормозная магистраль может быть как сквозной, так и автономной, а рассредоточенные локомотивы могут управляться синхронно или по каким-то другим правилам.

Тормозная сила, действующая на экипаж при пневматическом или электропневматическом торможениях, определяется следующим образом:

$$Fb_j = -n_j \cdot \varphi_j \cdot k_j(t) \cdot fc,$$

где n_j – количество тормозных колодок в j -ом экипаже, φ_j – коэффициент трения тормозных колодок о колесо, который зависит от типа тормозных колодок, силы нажатия колодки на колесо и скорости движения [1; 4], $k_j(t)$ – сила

нажатия на одну тормозную колодку, fc – коэффициент, который зависит от погодных условий, наличия песка в локомотиве и учитывает изменения условий сцепления колеса с рельсом.

Число тормозных колодок для каждого экипажа определяется с помощью его основных характеристик – количества осей и вида нажатия (см. табл. 1) – которые задаются в исходных данных.

Сила нажатия на тормозную колодку определяется состоянием воздухораспределителя, который может создавать в тормозном цилиндре давление сжатого воздуха, соответствующее величине разрядки тормозной магистрали или полному или частичному (при ступенчатом отпуске) выпуску сжатого воздуха из цилиндров при повышении давления в магистрали.

При регулировочном снижении скорости движения поездов может быть произведена I-я, II-я или III-я ступени торможений. В зависимости от выбранной ступени предполагается, что тормозной цилиндр наполняется сжатым воздухом соответственно на 40 %, 60 % и 88 % от максимального значения давления. Максимальные значения давления воздуха в тормозном цилиндре зависят от режимов работы воздухораспределителя; их значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальное давление в тормозном цилиндре

Режим в/р	Давление, атм
груженный	3,8
средний	2,5
порожний	1,5

При исследовании различных видов торможений задается вид торможения (ступень регулировочного торможения, ПСТ, ЭТ или падение давления, вызванное разрывом тормозной магистрали в заданном сечении поезда). В соответствии с этим моделируется работа воздухораспределителя и определяются значения сил нажатия в каждый момент времени. Воздухо-распределитель на каждом экипаже срабатывает в момент прихода тормозной волны от источника разрядки тормозной магистрали. Изменение силы нажатия на тормозную колодку $k_j(t)$ в процессе наполнения тормозного цилиндра происходит по экспоненциальному закону, а при выпуске сжатого воздуха – по линейному закону. При определении силы нажатия учитывается этап подвода тормозных коло-

док и время наполнения тормозных цилиндров, которое зависит от вида торможения (ПСТ или ЭТ), режима работы воздухораспределителей на пассажирских вагонах (длинносоставный или короткосоставный), а также места нахождения данного экипажа по отношению к источнику разрядки тормозной магистрали.

Сила, действующая на локомотив в тяговом режиме или при электрическом торможении F_{ft} , определяется согласно заданным тяговым или тормозным характеристикам, соответствующим выбранному локомотиву.

Сила основного сопротивления поступательному движению поезда для j – го экипажа W_{o_j} зависит от типа экипажа (грузовой, пассажирский вагоны или локомотив), и вида пути (стыковой или бесстыковой). Для грузовых вагонов при определении W_{o_j} учитывается также тип подшипников (качения или скольжения), нагрузка на ось и количество осей. При вычислении указанной силы для локомотивов учитывается режим движения (тяговый).[5]

Сила сопротивления от профиля пути для j - го экипажа определяется по формуле

$$W_{i_j} = \left(-i - \frac{200}{R} - 1.495 \cdot \frac{V_j^2}{R} + 9.197 \cdot H_r \right) \cdot 0.001 \cdot g \cdot m_j,$$

где i – величина уклона в промилле (знак уклона задается согласно правилам тяговых расчетов: на спуске - со знаком « - », на подъеме – со знаком « + »), V_j – скорость экипажа, R – радиус круговой кривой в плане, H_r – возвышение наружного рельса [5]. В приведенной формуле величины радиуса круговой кривой и возвышения наружного рельса изменяются на входной и выходной кривых от нуля до заданного значения.

В предлагаемом программном комплексе исходные параметры участка пути задаются с помощью двух таблиц «Профиль участка» «План участка». В таблице «Профиль участка» задаются длины элементов продольного профиля с постоянным уклоном и величины уклонов. В таблице «План участка» задаются:

- длина прямого участка;
- длина переходной кривой на входе в кривую (входная кривая);
- длина круговой кривой;
- длина переходной кривой на выходе из кривой (выходная кривая);

- радиус круговой кривой;
- величина возвышения наружного рельса кривой;
- величина зазора в колее на прямом участке пути;
- величина зазора на кривой.

Кроме модели, имитирующей продольные колебания поезда и позволяющей оценить продольные силы, ускорения, тормозные пути и т.п., нами разработано программное обеспечение для изучения пространственных колебаний экипажа, движущегося в составе поезда. Пространственная модель позволяет оценить так же динамические показатели, среди которых наиболее важным является показатель, характеризующий безопасность движения экипажа – коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса.

Для построения пространственных моделей использован объектно-ориентированный подход. При этом модель экипажа разбивается на отдельные объекты и связи между ними. Объектами здесь называются недеформируемые элементы конструкции экипажа, имеющие определенные инерционные свойства (параметры). Связи это деформируемые элементы конструкции и предназначенные для соединения объектов между собой. Связи могут быть различными по типу: упруго-вязкие или упруго-фрикционные (линейные или билинейные), «сухое трение», связи, учитывающие явления крипа (между колесом и рельсом) и т.д.

В качестве объектов могут быть выбраны, например, все инерционные конструктивные элементы, или часть из них, которая может быть объединена в один объект; при этом остальные могут выступать в качестве отдельных объектов. Все объекты имеют как минимум один инерционный параметр – массу. Кроме этого объекты могут иметь и другие инерционные параметры – моменты инерции относительно главных центральных осей (если есть необходимость рассмотреть угловые колебания объектов). Кроме этого для каждого объекта задаются координаты его центра масс. Вертикальная координата задается относительно уровня головки рельса (ясно, что при этом вертикальные координаты центров масс рельс равны нулю). Поперечные координаты – относительно оси пути, а продольные – относительно первой колесной пары рассматриваемого экипажа.

Как было сказано выше, связи – это деформируемые элементы конструкции экипажа. Характерной и очевидной связью являются рас-

сорные комплекты, имеющие реальные деформируемые пружины. Однако, для унификации построения модели связями так же являются элементы, не имеющие в реальной конструкции деформируемых элементов, но служащие той же цели – объединение инерционных элементов конструкции в единое целое. Поэтому, в пространственной модели связями так же являются места соединения инерционных элементов между собой. Такие связи имеют большие значения жесткостей, а поглощение энергии в таких связях, при необходимости, учитывается с помощью коэффициентов вязкости конструкции или с помощью коэффициентов трения, когда соединяемые элементы конструкции могут перемещаться друг относительно друга, например, в пределах зазора, как это имеет место в пятниковом узле грузового вагона.

Такой подход позволяет при интегрировании рассматривать не шесть (по числу степеней свободы), а всего одно дифференциальное уравнение колебаний для каждого объекта. В этом уравнении обобщенной координатой могут быть одна из трех линейных или одна из трех угловых координат перемещения объекта. Ускорение движения объекта определяется как сумма внешних воздействий (т.е. сумма сил или моментов сил, в зависимости от того является координата линейной или угловой) отнесенная к инерционному коэффициенту (опять же в зависимости от типа координаты). Каждый элемент суммы внешних воздействий (усилие в связи или момент силы, передающийся на нее) вычисляется как некая функция от взаимного перемещения и, при необходимости, скорости взаимного перемещения объектов. Вид этой функции определяется типом связи – например, линейная упруго-вязкая или упруго-фрикционная, или связь, обладающая только сухим трением, или любая комбинация этих типов связей. В программном комплексе предусмотрен весь необходимый набор типов связей, однако при необходимости предусмотрена довольно простая процедура введения нового типа связей. При задании параметров связей (кроме собственно параметров связи) задаются координаты (со знаком) точек приложения связей к объектам. Это позволяет автоматически определять знаки моментов сил, передающихся на эти связи. Все три координаты точек приложения связи задаются относительно центра масс объекта.

Заданные в модели величины параметров объектов и связей могут быть легко изменены (без изменения типа объекта или связи) исполь-

зуя аномалии объектов и связей. Заданные аномальные величины параметров действительны при выполнении текущего расчета и не изменяют соответствующие величины в самой модели.

Интегрирование системы дифференциальных уравнений выполняется теми же методами, что и дифференциальных уравнений продольной динамики поезда.

Результатами моделирования являются перемещения по всем шести координатам всех объектов, деформации и силы в связях по всем шести координатам (естественно, шесть координат будут только для тех объектов для которых, кроме массы заданы все три момента инерции). Кроме этого, по силам в специально выбранных пользователем связях определяются коэффициенты динамики, в том числе, коэффициенты запаса устойчивости колеса от схода с рельса. Эти величины в ходе моделирования регистрируются и как процессы и как вероятностные величины с заданным пользователем уровнем доверительной вероятности. Вероятностные показатели необходимы для оценки динамических свойств и устойчивости движения экипажа, а графики процессов этих показателей полезны при анализе результатов (например, для определения точки пути, где какой-либо показатель превысил свое допустимое значение).

Для решения поставленной задачи необходимо сформировать задание для расчета. В нем указывается название участка пути, для которого в базе данных имеются все характеристики (параметры профиля и плана участка пути), состояние пути (отличное, среднее или плохое), тип пути (стыковой или бесстыковой). Состояние пути определяется уровнем неровностей пути и величиной сопротивления движению поезда [5].

В задании указывается также:

- название поезда, для которого в базе данных указаны необходимые исходные данные (см. табл. 1);
- начальное состояние поезда (растянут, сжат или зазоры в межвагонных соединениях распределены вдоль состава произвольным образом);
- величина скорости поезда в момент начала моделирования;
- номера экипажей, для которых в процессе моделирования движения поезда будут определены динамические показатели и показатели устойчивости движения. При этом появляется окно для задания параметров простран-

ственной модели и условий движения исследуемого экипажа;

– режимная карта (режимы управления поездом), в которой задается номер тяговой или тормозной позиции, положение рукоятки прямодействующего тормоза локомотива, режим пневматического или электропневматического торможений (три ступени регулировочного торможения, полное служебное или экстренное торможение, обрыв тормозной магистрали поезда, с указанием номера вагона). Указанные режимы управления могут переключаться по значениям скорости движения, или времени или по координаты пути.

Процесс расчета может быть остановлен по показаниям скорости движения (когда скорость в данный момент времени окажется меньше заданной), по времени (когда время движения поезда будет больше заданного), или по координате пути (когда пройденный путь окажется больше заданного).

В результате расчета могут быть получены:

- осциллограммы продольных сил и ускорений;
- распределение вдоль поезда наибольших максимальных значений сил и ускорений;
- значения максимальных продольных усилий в поезде в данный момент времени с указанием номера сечения, в котором они возникали;
- траектория движения.

При изучении пространственных колебаний экипажа могут быть также получены:

- осциллограммы деформаций всех связей модели исследуемого экипажа;
- осциллограммы линейных (вертикальные, поперечные и продольные) и угловых (галопирование, боковая качка и виляние) перемещений объектов;
- усилий в связях пространственной модели;
- динамические показатели - процессы изменения во времени коэффициентов динамики (вертикальной и горизонтальной), в том числе коэффициентов запаса устойчивости от схода колеса с рельс.

Апробация разработанной математической модели производилась путем сопоставления результатов, полученных путем численного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих движение поезда, с результатами многочисленных специальных опытов, проведенных в реальных условиях железных дорог и опытного полигона ВНИИЖТа (Россия). Рас-

хождения при оценке наибольших сил, ускорений и тормозных путей не превышали 15 %.

Рассмотренные модели неоднократно применялись нами при проведении экспертизы инцидентов, связанных со сходами вагонов в грузовых поездах на сети железных дорог Украины и России. Так 1 февраля 2007 года на перегоне Просница–Бумкомбинат Курского отделения Горьковской железной дороги произошел сход вагонов (с 59-го по 74-й) в соединенном поезде № 1904/1923 массой 11917 тонн, состоящего из 131 полностью груженого четырехосного вагона (рис. 1).

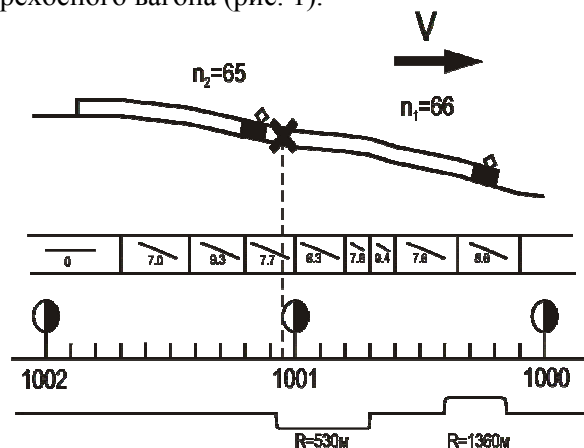


Рис. 1. Схема движения поезда

При математическом моделировании рассматриваемого инцидента принимались во внимание исходные данные, составленные на базе предоставленных российской стороной материалов:

- расшифровки файлов поездки с картриджа № 59035 (поезд № 1903, электровоз ВЛ-80С № 653) и с картриджа №54854 (поезд № 1923, электровоз ВЛ-80С № 701);
- справки по расшифровке скоростемерных лент поезда № 1903-2031, эл. ВЛ-80С № 653 и поезда № 2033-1923, эл. ВЛ-80С № 701;
- справки о тормозах поезда № 2033(локомотив ВЛ-80С № 701) и поезда № 2031 (локомотив ВЛ-80С № 653);

схема места схода вагонов в соединенном грузовом поезде № 1903/1923 (см рис. 1).

Рассматривался переходный процесс с момента начала торможения на 1001 км 4пк до остановки поезда на 1000 км 9 пк, который был вызван одновременной разрядкой тормозной магистрали на 0,8 атм головным и вспомогательным локомотивами и последующим падением давления до 1,9 атм в тормозной магистрали у головного локомотива.

Ниже приведены некоторые результаты моделирования:

- распределение вдоль поезда максимальных значений растягивающих (+) и сжимающих (–) продольных усилий, которые имели место за весь рассматриваемый период (рис. 2);
- осциллограммы продольных усилий в автосцепках перед первым и 59-м вагоном, который сошел первым (рис. 3);

– кривая изменения скорости движения поезда с момента начала торможения до остановки поезда (рис. 4).

Как видно из анализа осциллограмм, на 16-ой секунде после начала торможения, на 59-й вагон в течении 2-х секунд действовала сжимающая сила квазистатического характера, превышающая 100 тс (1000 кН).

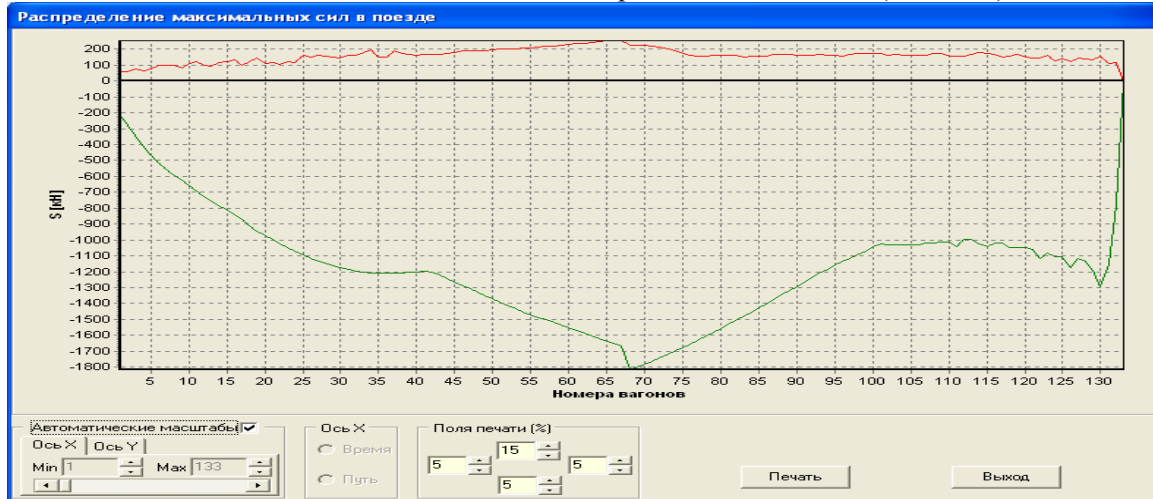


Рис. 2. Распределение вдоль поезда максимальных значений продольных усилий за весь рассматриваемый период движения поезда № 1903/1023

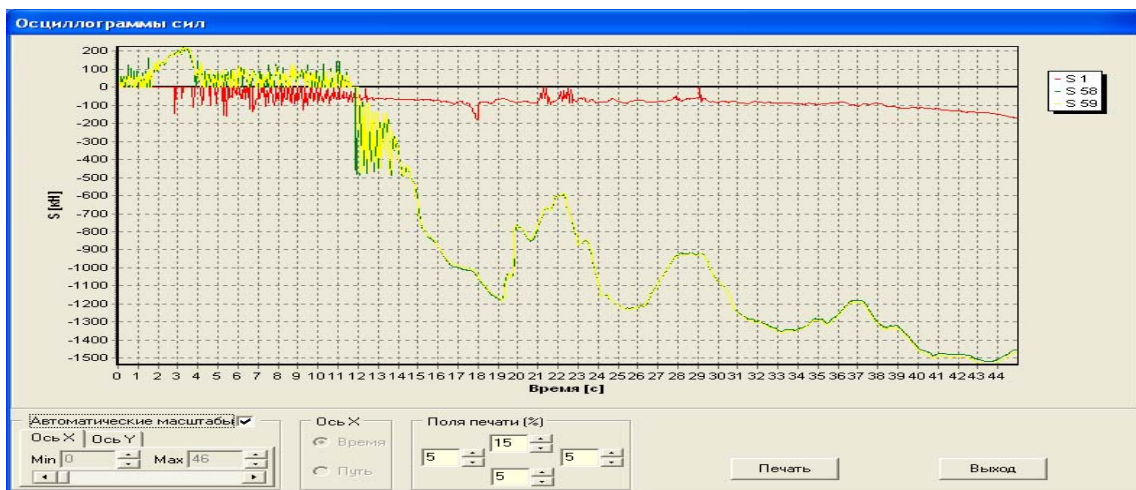


Рис. 3. Осциллограммы продольных усилий в автосцепках перед первым (S_1) 58-м (S_{58}) и 59-ым (S_{59}) вагонами с момента начала торможения и до остановки соединенного поезда весом 11917 т (Горьковская ж.д. 01.02.2007 г.)

Как уже упоминалось, этого достаточно для выдавливания 4-хосного груженого полувагона на тележках 18-100. Способствовало сходу еще и то, что в это время 59-й вагон двигался по круговой кривой радиусом 530 метров.

Заметим, что по данным материалов расследования первым сошел 59-й вагон на 15-й секунде с момента начала торможения, а по результатам расчетов – на 17 с. Такое незначительное расхождение возможно связано с тем, что промежуток времени подвода колодок к колесу после появления давления в тормозном

цилиндре при моделировании был принят равным 1,84 с, в то время как в реальных поездах это время может колебаться в пределах от 1,4 до 1,9 с. Кроме этого следует учитывать и нестабильность характеристик воздухораспределителей в реальных поездах.

Этим объясняется и незначительное (5 %) расхождение в тормозном пути: по результатам расчетов он составил – 460 м (см. рис. 4), а по материалам расследования он равен 488 м.

Такое согласование результатов – еще одно доказательство достоверности моделирования.

Из приведенных примеров следует, что имеющееся математическое и программное обеспечение и достоверные данные об объекте

исследования или инциденте позволяют получить достаточно достоверные результаты при решении задач в области динамики поезда.

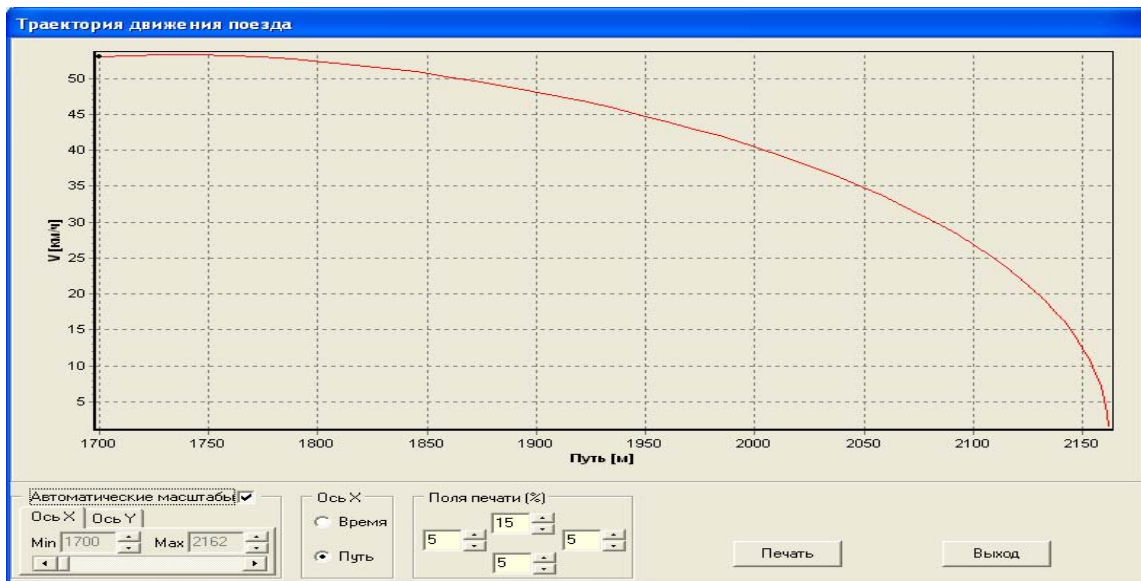


Рис. 4. График изменения скорости движения от начала торможения до остановки соединенного поезда массой 11917 т (Горьковская ж.д. 01.02.2007 г.)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блохин Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. - М.: Транспорт, 1982. - 222 с.
2. Урсуляк Л. В. Новый подход к решению задачи о моделировании продольной динамики и поступательного движения поезда / Л. В. Урсуляк, К. И. Железнов. Вісник ДІТУ. Вип. 8. - Д., 2005. С. 107-112.

3. Метьюз Д. Г. Численные методы. Использование MATLAB / Д. Г. Метьюз, К. Д. Финк. - М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. - 714 с.

4. Блохин Е. П. Расчеты и испытание тяжеловесных поездов / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер, Л. Г. Маслеева, В. М. Михайленко, Н. И. Грановская. - М.: Транспорт, 1986. - 263 с.

5. Правила тяговых расчетов для поездной работы. - М.: Транспорт, 1985. - 287 с.

Поступила в редколлегию 03.07.2007.