РАЗДЕЛ XII. МАШИНОСТРОЕНИЕ

Волков И.В., Булавин Ю.П., Коновалов П.Ю.

К расчету изгибных колебаний кузова трехтележного рельсового экипажа

*Ростовский государственный университет путей сообщения
(Россия, Ростов-на-Дону)*

doi: 10.18411/lj-08-2020-50

idsp: ljournal-08-2020-50

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы, связанные с расчетом собственных частот изгибных колебаний кузовов локомотивов и вагонов. Кузов рельсового экипажа представлен в виде тонкостенной балки, опирающейся на три упругие опоры, которые характеризуются коэффициентами жесткости, равными эквивалентным жесткостям рессорного подвешивания каждой из трех тележек. На основе функций Крылова получена матрица, позволяющая определить собственные значения и функции рассматриваемой краевой задачи, а на их основе – собственные частоты и формы изгибных колебаний балки.

Ключевые слова: Локомотив, вагон, кузов, изгибные колебания, собственные частоты колебаний.

Abstract

The article deals with issues related to the calculation of natural frequencies of bending vibrations of locomotive and carriage bodies. The body of the rail carriage is presented in the form of a thin-walled beam resting on three elastic supports, which are characterized by stiffness coefficients equal to the equivalent stiffness of the spring suspension of each of the three bogies. Based on the Krylov functions, a matrix is obtained that allows one to determine the eigenvalues and functions of the considered boundary value problem, and on their basis - the natural frequencies and forms of bending vibrations of the beam.

Keywords: Locomotive, carriage, body, bending vibrations, natural vibration frequencies.

Математические модели получили широкое распространение при прогнозировании показателей динамических качеств железнодорожного подвижного состава [1, 2, 3, 4] и показателей его сцепных свойств [5, 6, 7]. При анализе колебаний рельсовых экипажей их обычно рассматривают как совокупность дискретных масс, соединенных упруго-диссипативными связями. Кроме того, в ряде динамических расчетов возникает необходимость представления кузовов подвижного состава как упругих тел с распределенными упруго-инерционными параметрами. В частности, в ОАО «РЖД» в качестве нормативного показателя используется нижняя граница первой собственной частоты изгибных колебаний кузовов в вертикальной продольной плоскости [8], которая в целях обеспечения требований к плавности хода, например, для электропоездов и пассажирских вагонов при наибольшей расчетной населенности вагона и в порожнем состоянии должна быть на уровне, соответственно, 8 и 10 Гц, а для локомотивов – 8 Гц. Необходимо также стремиться к тому, чтобы эти частоты были выше собственных частот колебаний подпрыгивания и галопирования тележек не менее чем на 40%.

Рассмотрим особенности расчета изгибных колебаний кузовов трехтележных экипажей. Воспользуемся для этого одномерной схематизацией упруго-инерционных

свойств кузова как деформируемого твердого тела, рассматривая кузов в виде однородной тонкостенной балки с недеформируемым контуром поперечного сечения. Свяжем систему координат zOx с левым концом кузова, тогда, согласно расчетной схеме, показанной на рисунке 1, уравнение изгибных колебаний кузова трехтележного экипажа можно упрощенно представить в виде [8, 9]

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = - \sum_{i=1}^3 c_i z(b_i, t) \delta(x - b_i),$$

где EI – изгибная жесткость кузова;

μ – распределенная масса кузова;

t – время;

c_i – приведенная жесткость системы подвешивания кузова на i -ой тележке ($i=1, 2, 3$);

b_i – продольная координата точки опирания кузова на систему подвешивания i -ой тележки;

$\delta(x)$ – дельта функция Дирака.

Данное дифференциальное уравнение в частных производных представляет собой краевую задачу, которая характеризуется следующими граничными условиями:

$$EI \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = 0; \quad EI \frac{\partial^3 y(x,t)}{\partial x^3} = 0 \quad \text{где } x = 0, x = L,$$

где L – длина кузова.

Расчетная схема упругих колебаний кузова трехтележного рельсового экипажа представляет собой двухконсольную балку, опирающуюся, для общности, на три произвольно расположенные упругие опоры с различными коэффициентами жесткости. У реальных экипажей обычно равны длины консолей, а также соблюдаются равенства $c_1=c_3$ и $b_2=L/2$. Схема обладает универсальностью, поскольку позволяет также рассчитывать и изгибные колебания кузовов двухтележных экипажей при $c_2=0$.

Рисунок 1. Расчетная схема кузова трехтележного экипажа

Введем в рассмотрение функции Крылова [8]

$$S(\alpha x) = \frac{1}{2}(\operatorname{ch} \alpha x + \cos \alpha x),$$

$$T(\alpha x) = \frac{1}{2}(\operatorname{sh} \alpha x + \sin \alpha x),$$

$$U(\alpha x) = \frac{1}{2}(\operatorname{ch} \alpha x - \cos \alpha x),$$

$$V(\alpha x) = \frac{1}{2}(\operatorname{sh} \alpha x - \sin \alpha x),$$

где α – собственное число краевой задачи, $\alpha = \sqrt[4]{\frac{\mu\omega^2}{EI}}$; здесь ω – циклическая частота колебаний кузова.

Для определения частот и форм собственных упругих колебаний кузова воспользуемся полученным на основе преобразования Лапласа в работе [8] выражением формы изгибных колебаний балки на упругих опорах

$$f(\alpha, x) = AS(\alpha x) + BT(\alpha x) + \frac{c_i L^3}{\alpha^3 EI} \sum_{i=1}^3 \bar{y}(b_i, p) V(x - b_i) h(x - b_i), \quad (1)$$

где p – оператор Лапласа;

$$\bar{y}(x, p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} y(x, t) dt;$$

A, B – произвольные постоянные, определяемые из граничных условий;

$h(x)$ – единичная функция Хевисайда.

Тогда при нулевых граничных условиях рассматриваемой краевой задачи в частотной области

$$EI \bar{y}''(x, p) = 0; \quad EI \bar{y}'''(x, p) = 0 \quad \text{и} \quad x = 0, \quad x = L$$

соответствующая матрица коэффициентов системы нелинейных алгебраических уравнений принимает вид

$$G_0 = \begin{bmatrix} S\left(\alpha \frac{b_1}{L}\right) & T\left(\alpha \frac{b_1}{L}\right) & -1 & 0 & 0 \\ S\left(\alpha \frac{b_2}{L}\right) & T\left(\alpha \frac{b_2}{L}\right) & \frac{c_1 L^3}{\alpha^3 EI} V\left(\alpha \frac{b_2 - b_1}{L}\right) & -1 & 0 \\ S\left(\alpha \frac{b_3}{L}\right) & T\left(\alpha \frac{b_3}{L}\right) & \frac{c_1 L^3}{\alpha^3 EI} V\left(\alpha \frac{b_3 - b_1}{L}\right) & \frac{c_2 L^3}{\alpha^3 EI} V\left(\alpha \frac{b_2 - b_1}{L}\right) & -1 \\ U(\alpha) & V(\alpha) & \frac{c_3 L^3}{\alpha^3 EI} T\left(\alpha \frac{b_3}{L}\right) & \frac{c_2 L^3}{\alpha^3 EI} T\left(\alpha \frac{b_2}{L}\right) & \frac{c_1 L^3}{\alpha^3 EI} T\left(\alpha \frac{b_1}{L}\right) \\ T(\alpha) & U(\alpha) & \frac{c_3 L^3}{\alpha^3 EI} S\left(\alpha \frac{b_3}{L}\right) & \frac{c_2 L^3}{\alpha^3 EI} S\left(\alpha \frac{b_2}{L}\right) & \frac{c_1 L^3}{\alpha^3 EI} S\left(\alpha \frac{b_1}{L}\right) \end{bmatrix}.$$

Условием существования нетривиальных решений указанной системы уравнений является выполнение равенства

$$\det G_0 = 0.$$

Искомое собственное число рассматриваемой краевой задачи является такое значение α , при котором выполняется сформулированное условие нетривиальности решений, причем переход от собственных чисел к частотам изгибных колебаний кузова выполняется по формуле

$$f = \frac{\alpha^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}},$$

а форма колебаний вычисляется согласно зависимости (1).

Таким образом, в данной статье получено выражение, позволяющее определить собственные частоты и формы изгибных колебаний однородных кузовов двух- и трехтележных рельсовых экипажей. Для неоднородных кузовов частоты и формы изгибных колебаний можно определять с использованием численных методов [10]. Для уточненных расчетов упругих колебаний кузовов в качестве расчетной схемы вместо

тонкостенной балки можно использовать тонкостенный стержень, изгибные деформации которого вызывают также деформации контура поперечного сечения [11, 12].

1. Ворон, О.А. Моделирование колебаний вагона с тележками КВЗ-И2 и текстопным приводом подвагонного генератора / О.А. Ворон, Ю.П. Булавин, И.В. Волков // Вестник РГУПС. – 2016. – № 3. – С. 14-22.
2. Волков, И.В. Прогнозирование динамических характеристик перспективного рефрижераторного подвижного состава / И.В. Волков, Ю.П. Булавин, Е.А. Булавина // Международный конгресс «Механика и трибология транспортных систем». – Ростов н/Д: РГУПС, 2003. – С. 205-206.
3. Волков, И.В. Применение пакета MathCAD при расчете механической части локомотивов / И.В. Волков, В.Г. Рубан, А.М. Матва, Р.Х. Уразильдеев: учебное пособие. – Ростов н/Д: РГУПС, 2000. – 64 с.
4. Бирюков, И.В. Механическая часть тягового подвижного состава / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
5. Волков, И.В. Преобразование зависимостей расчетного коэффициента сцепления электровозов от скорости / И.В. Волков // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта и подготовки специалистов: тезисы докладов научно-техн. конференции. – Ростов н/Д: РГУПС, 1998. – С. 178-179.
6. Волков, И.В. К вопросу прогнозирования уровня сцепления колес локомотивов с рельсами, находящимися в различных климатических условиях / И.В. Волков, Ю.М. Лужнов, С.А. Кондратенко // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 7. – С. 42-44.
7. Волков, И.В. Применение метода Монте-Карло для анализа сцепных свойств электровозов на основе погодных-климатических данных / И.В. Волков, П.Ю. Коновалов // Вестник РГУПС. – 2012. – № 2. – С. 57-66.
8. Волков, И.В. Прогнозирование динамических характеристик подвижного состава на основе математического моделирования: монография. / И.В. Волков. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. – 136 с.
9. Волков, И.В. К вопросу о повышении достоверности динамических характеристик перспективного изотермического подвижного состава / И.В. Волков, О.А. Ворон, Ю.П. Булавин и др. // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4 (47). – С. 108. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4405.
10. Волков, И.В. Применение метода прогонки для исследования упругих колебаний кузовов подвижного состава / И.В. Волков // Межвузовский тематический сборник трудов «Некоторые проблемы высокоскоростного наземного транспорта». – Ростов н/Д: РИИЖТ, 1980. – С. 20-24.
11. Волков, И.В. Динамическая модель деформируемого кузова рельсового экипажа / И.В. Волков, Ю.П. Булавин // Вестник РГУПС.–2017.–№ 1.– С. 47-54.
12. Волков, И.В. Выбор координатных функций для численного исследования упругих колебаний кузовов подвижного состава / И.В. Волков, Ю.П. Булавин, П.Ю. Коновалов // Тенденции развития науки и образования. – 2018. – № 38-4. – С. 33-36.

Жигайлов А.В., Толстоухова Т.Н., Моисеев О.Н., Иванов П.А., Шевырев Л.Ю.

**Анализ и обоснование параметров рабочих органов зерновой сеялки внут-
рипочвенного разбросного посева**

*Азово-Черноморский инженерный институт – филиал ФГБОУ ВО Донской
государственный аграрный университет
(Россия, Зерноград)*

doi: 10.18411/lj-08-2020-51

idsp: ljjournal-08-2020-51

Аннотация

Предложена функциональная модель сеялки для внутрипочвенного разбросного посева. Проведены анализ и обоснование параметров рабочих органов зерновой сеялки разбросного посева, рассмотрено их влияние на распределение семян в подсошниковом пространстве.

Ключевые слова: внутрипочвенный разбросной посев, подсошниковое пространство, распределитель семян.