болезней легких на производствах, связанных с получением, обработкой и созданием изделий из текстолита.

Аналогично, опасной является и термическая обработка текстолита: несмотря на то, что этот материал термостоек и способен долгое время сохранять свои свойства при высоких температурах, он выделяет токсичные вещества при нагревании до температуры выше 400 оС. К таким веществам относятся производные фенола и, собственно, фенол, углекислый газ, различные углеводороды.

Таким образом, текстолит, как прочный, легкий и влагостойкий материал с особыми диэлектрическими свойствами, является незаменимым в различных областях, преимущественно, в машиностроении и строительстве. Тем не менее, у этого материала есть и недостатки, связанные, в основном, с риском, сопряженным с работой с текстолитом. Как механическая, так и термическая обработка этого материала приводит к ненамеренному выделению в воздух рабочей зоны токсичных веществ, которые обычно являются канцерогенами или аллергенами. Кроме того, текстолит недостаточно прочен для ряда условий.

1. Кузнецов Е. В., Прохорова И. П. Альбом технологических схем производства полимеров и пластических масс на их основе. Изд. 2-е. М., Химия, 1975. 74 с.
2. Кноп А., Шейб В. Фенольные смолы и материалы на их основе. М., Химия, 1983. 279 с.
3. Бахман А., Мюллер К. Фенопласты. М., Химия, 1978. 288 с.
4. Николаев А. Ф. Технология пластических масс, Л., Химия, 1977. 366 с.
5. Нестерова О.М., Аккуратова О.Л., Плотникова Л.С. Способ получения резольной фенолоформальдегидной смолы. МПК: C08G8/10. Оpubл. 09.02.1995.
6. Соловьёв В.Л., Трояновский С.П., Цветков В.В. Применение металлографитовых материалов для изготовления конструкционных деталей. МПК: C22C33/02. Оpubл. 10.10.2003.

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

Выбор координатных функций для численного исследования упругих колебаний кузовов подвижного состава

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

doi:10.18411/lj-05-2018-85

idsp: 000001:lj-05-2018-85

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы выбора и вычисления координатных функций для последующего применения метода Бубнова-Галеркина при численном исследовании упругих колебаний кузовов рельсовых экипажей.

Ключевые слова: Координатные функции, краевая задача, собственные числа, собственные функции, балка Тимошенко, метод Бубнова-Галеркина.

Динамические характеристики подвижного состава определяют не только его показатели динамических качеств [1-3], но и сцепные свойства [4-7]. В работе [8] рассмотрены вопросы, связанные с повышением достоверности динамических характеристик вагонов, а в работе [9] показана динамическая модель рельсового экипажа с деформируемым кузовом, позволяющая рассмотреть специфические вопросы, характерные для динамики скоростного и длиннобазного подвижного состава [1]. В частном случае, при использовании в качестве расчетной схемы деформируемого кузова тонкостенного стержня, уравнения динамической модели сводятся к известным уравнениям движения балки Тимошенко [10], которые, в свою очередь, после несложных преобразований приведены к следующему дифференциальному уравнению, учитывающему инерцию вращения и деформацию сдвига стержня (балки):

$$EI \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^4} + \rho F \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - \rho I \left(1 + \frac{E}{k'G} \right) \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{I \rho^2}{k'G} \frac{\partial^4 \xi}{\partial t^4} = 0,$$

где ξ – обобщенное перемещение, обусловленное изгибом стержня; t – время; x – продольная координата стержня; E, G – модули упругости и сдвига; ρ – плотность материала; F, k' – геометрические характеристики [9].

Разделим переменные, сделав подстановку Фурье

$$\xi(x, t) = y(x) \sin(\omega t).$$

Тогда исходное дифференциальное уравнение примет вид

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \left(\frac{\alpha}{l} \right)^4 \frac{I(k'G + E)}{k'FG} \frac{d^2 y}{dx^2} - \left(\frac{\alpha}{l} \right)^4 \left(1 - \frac{EI^2 \alpha^4}{k'F^2 G l^4} \right) y = 0,$$

где l – длина стержня; α – собственное число краевой задачи; $\alpha = l \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho F \omega^2}{EI}}$; здесь ω – циклическая частота упругих (изгибных) колебаний стержня.

Сделав подстановку $y = A \cdot \exp\left(\alpha \frac{x}{l}\right)$, где A – некоторая постоянная, приведем частное решение данного дифференциального уравнения к виду

$$\alpha^4 + (b_1 + b_2)\alpha^4 - (1 - b_1 b_2 \alpha^4)\alpha^4 = 0,$$

где $b_1 = \frac{I}{Fl^2}$; $b_2 = \frac{EI}{k'FGl^2}$.

Полученное алгебраическое уравнение имеет два действительных корня: $\pm \alpha_1$ и два мнимых: $\pm j\alpha_2$, причем

$$\alpha_1 = \sqrt{-\frac{b_1 + b_2}{2} \alpha^4 + \sqrt{\left(\frac{b_1 + b_2}{2} \alpha^4\right)^2 + (1 - b_1 b_2 \alpha^4) \alpha^4}};$$

$$\alpha_2 = \sqrt{+\frac{b_1 + b_2}{2} \alpha^4 + \sqrt{\left(\frac{b_1 + b_2}{2} \alpha^4\right)^2 + (1 - b_1 b_2 \alpha^4) \alpha^4}}.$$

При рассмотрении граничных условий частотное уравнение для определения собственных чисел и форм изгибных колебаний кузова с учетом инерции вращения и деформации сдвига наиболее просто получить на основе метода начальных параметров в матричной форме [1]. В этом случае переходная матрица может быть представлена в виде

$$P(x) = \begin{pmatrix} C_{11}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{12}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{13}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{14}(\alpha_1, \alpha_2) \\ \alpha^4 C_{21}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{22}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{23}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{24}(\alpha_1, \alpha_2) \\ \alpha^4 C_{31}(\alpha_1, \alpha_2) & \alpha^4 C_{32}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{33}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{34}(\alpha_1, \alpha_2) \\ \alpha^4 C_{41}(\alpha_1, \alpha_2) & \alpha^4 C_{42}(\alpha_1, \alpha_2) & \alpha^4 C_{43}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{44}(\alpha_1, \alpha_2) \end{pmatrix},$$

$$\text{где } C_{11}(\alpha_1, \alpha_2) = c_2 \cdot \operatorname{ch} \alpha_1 \frac{x}{l} + c_1 \cdot \cos \alpha_2 \frac{x}{l};$$

здесь $c_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{(b_2 - b_1) \alpha^2}{\sqrt{4 + (b_2 - b_1)^2 \alpha^4}} \right); \quad c_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{(b_2 - b_1) \alpha^2}{\sqrt{4 + (b_2 - b_1)^2 \alpha^4}} \right);$

$$C_{12}(\alpha_1, \alpha_2) = c_0 \left(\alpha_1 \cdot sh \alpha_1 \frac{x}{l} + \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2 \frac{x}{l} \right); \text{ здесь } c_0 = \frac{1}{\alpha^2 \sqrt{4 + (b_2 - b_1)^2 \alpha^4}};$$

$$C_{13}(\alpha_1, \alpha_2) = c_0 \left(ch \alpha_1 \frac{x}{l} - \cos \alpha_2 \frac{x}{l} \right);$$

$$C_{14}(\alpha_1, \alpha_2) = \alpha^{-4} \left(\alpha_1 c_2 sh \alpha_1 \frac{x}{l} - \alpha_2 c_1 \sin \alpha_2 \frac{x}{l} \right);$$

$$C_{21}(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{c_0}{\alpha_1} \cdot sh \alpha_1 \frac{x}{l} - \frac{c_0}{\alpha_2} \cdot \sin \alpha_2 \frac{x}{l};$$

$$C_{22}(\alpha_1, \alpha_2) = c_1 \cdot ch \alpha_1 \frac{x}{l} + c_2 \cdot \cos \alpha_2 \frac{x}{l};$$

$$C_{23}(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{c_1}{\alpha_1} \cdot sh \alpha_1 \frac{x}{l} + \frac{c_2}{\alpha_2} \cdot \sin \alpha_2 \frac{x}{l};$$

$$C_{32}(\alpha_1, \alpha_2) = \alpha^{-4} \left(\alpha_1 c_1 \cdot sh \alpha_1 \frac{x}{l} - \alpha_2 c_2 \cdot \sin \alpha_2 \frac{x}{l} \right);$$

$$C_{41}(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{c_2}{\alpha_1} \cdot sh \alpha_1 \frac{x}{l} + \frac{c_1}{\alpha_2} \cdot \sin \alpha_2 \frac{x}{l};$$

$$C_{13}(\alpha_1, \alpha_2) = C_{24}(\alpha_1, \alpha_2) = C_{31}(\alpha_1, \alpha_2) = C_{42}(\alpha_1, \alpha_2);$$

$$C_{22}(\alpha_1, \alpha_2) = C_{33}(\alpha_1, \alpha_2); \quad C_{12}(\alpha_1, \alpha_2) = C_{34}(\alpha_1, \alpha_2);$$

$$C_{21}(\alpha_1, \alpha_2) = C_{43}(\alpha_1, \alpha_2); \quad C_{11}(\alpha_1, \alpha_2) = C_{44}(\alpha_1, \alpha_2).$$

Граничные условия задачи отвечают незакрепленным концам стержня, что обращает в нуль изгибающий момент $M(x)$ и поперечную силу $Q(x)$ при $x=0$ и $x=l$. В результате уравнение для определения собственных чисел краевой задачи получается из условия существования нетривиальных решений, представленного в виде равенства

$$D(\alpha) = \begin{vmatrix} C_{31}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{32}(\alpha_1, \alpha_2) \\ C_{41}(\alpha_1, \alpha_2) & C_{42}(\alpha_1, \alpha_2) \end{vmatrix} = 0.$$

Решение данной задачи может быть выполнено на основе метода инвариантного погружения или других численных методов [12], принципиальные особенности которых показаны в [1].

Формы колебаний содержат по четыре произвольные постоянные, которые также определяются с использованием указанных четырех граничных условий задачи [11]. В результате получаем следующие выражения:

$$y(x) = c_2 \cdot ch \alpha_1 \frac{x}{l} + c_1 \cdot \cos \alpha_2 \frac{x}{l} - b_0 c_0 \left(\alpha_1 \cdot sh \alpha_1 \frac{x}{l} + \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2 \frac{x}{l} \right),$$

$$\text{где } b_0 = \frac{ch \alpha_1 - \cos \alpha_2}{c_1 \alpha_1 \cdot sh \alpha_1 - c_2 \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2} \cdot c_0 \alpha^4;$$

$$g(x) = \frac{\alpha^4 c_0}{l} \left(\frac{1}{\alpha_1} \cdot sh \alpha_1 \frac{x}{l} - \frac{1}{\alpha_2} \cdot \sin \alpha_2 \frac{x}{l} \right) - \frac{b_0}{l} \left(c_1 \cdot ch \alpha_1 \frac{x}{l} + c_2 \cdot \cos \alpha_2 \frac{x}{l} \right);$$

$$\frac{M(x)}{EI} = \frac{\alpha^4 c_0}{l^2} \left(ch \alpha_1 \frac{x}{l} - \cos \alpha_2 \frac{x}{l} \right) - \frac{b_0}{l^2} \left(c_1 \alpha_1 \cdot sh \alpha_1 \frac{x}{l} - c_2 \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2 \frac{x}{l} \right);$$

$$\frac{Q(x)}{EI} = \frac{\alpha^4}{l^3} \left(\left(\frac{b_2}{\alpha_1} \cdot sh \alpha_1 \frac{x}{l} + \frac{b_1}{\alpha_2} \cdot \sin \alpha_2 \frac{x}{l} \right) - b_0 c_0 \left(ch \alpha_1 \frac{x}{l} - \cos \alpha_2 \frac{x}{l} \right) \right).$$

Полученные выражения обладают свойством полноты, линейно независимы и удовлетворяют граничным условиям. Поэтому они могут быть использованы при численном исследовании на основе метода Бубнова-Галеркина упругих колебаний кузова по схеме тонкостенного стержня с деформируемым контуром поперечного сечения.

1. Волков, И.В. Прогнозирование динамических характеристик подвижного состава на основе математического моделирования / И.В. Волков: монография. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. – 136 с.
2. Волков, И.В. Моделирование колебаний вагона с тележками КВЗ-И2 и текстопным приводом подвагонного генератора / И.В. Волков, О.А. Ворон, Ю.П. Булавин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3. – С. 14-22.
3. 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.
4. Волков, И.В. Вопросы прогнозирования и особенности реализации сцепных свойств тягового подвижного состава / И.В. Волков, Ю.П. Булавин, П.Ю. Коновалов : монография. – Ростов н/Д: РГУПС, 2007. – 110 с.
5. Волков, И.В. Механическая часть электрического подвижного состава / И.В. Волков, Ю.П. Булавин, В.Г. Рубан, П.Ю. Коновалов : учеб. пособие. – Ростов н/Д: РГУПС, 2007. – 92 с.
6. 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.
7. Волков, И.В. Применение метода Монте-Карло для анализа сцепных свойств электровозов на основе погоднo-климатических данных / И.В. Волков, П.Ю. Коновалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 2 (46). – С. 57-66.
8. 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. – Том 47. – № 4 (47). – 12 с. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4405.
9. Волков И.В., Булавин Ю.П. Динамическая модель деформируемого кузова рельсового экипажа / И.В. Волков, Ю.П. Булавин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1. – С. 47-54.
10. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
11. 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.
12. Волков, И.В. Применение пакета MathCAD при расчете механической части локомотивов / И.В. Волков, В.Г. Рубан, А.М. Матва, Р.Х. Уразильдеев: учеб. пособие. – Ростов н/Д: РГУПС, 2000. – 64 с.

Горячко В.В., Львович Я.Е.

Моделирование и оптимизация при управлении эффективностью деятельности вузов с использованием данных мониторингов и рейтингов

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

(Россия, Воронеж)

АНОО ВО «Воронежский институт высоких технологий»

(Россия, Ростов-на-Дону)

doi:10.18411/lj-05-2018-86

idsp: 000001:lj-05-2018-86

Аннотация

В статье рассматриваются процедуры оптимизационного моделирования и оптимизационно-экспертного принятия решений при управлении эффективностью деятельности вузов на основе ГИС-ориентированного мониторинго-рейтингового оценивания. Предложена структура критерия оптимального выбора и ограничений, формируемых с использованием прогностических моделей и экспертных оценок,