

---

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ****А.С. Горобцов, А.А.Новокщёнов, А.А.Насонов, В.О. Фирсова (Волгоград)****Введение**

Для решения широкого класса задач моделирования при исследовании и проектировании машин используется метод моделирования динамики систем тел. В методе используется полная пространственная модель системы тел со связями, позволяющая моделировать динамику всех узлов конструкции при различных режимах движения машин. Построение модели системы тел на основе геометрии конструкции, ее параметризация и последующие расчеты различных режимов движения позволяют получить динамические характеристики (перемещения, скорости, ускорения, силы реакций в связях), которые можно использовать для анализа и в качестве входных данных для других моделей физических процессов.

Выбранный подход позволяет выполнять численный анализ различных физических процессов отдельных узлов конструкции, в частности, процессов теплонапряженности деталей. В модель системы тел вводятся вспомогательные подмодели отдельных деталей или областей внутри деталей, в которых протекает процесс теплопередачи. При этом на основе конструкторской геометрии строится дискретная модель, позволяющая провести расчет при заданных параметрах. В частности, силовые характеристики в парах трения и зубчатых зацеплениях, получаемые из полной модели машины, позволяют оценить тепловые потоки на границах контакта этих тел. Тепловые потоки на внутренних поверхностях корпуса и в парах трения, а также теплоотдача от внешней поверхности корпуса учитываются в граничных условиях дискретной модели теплопередачи.

Для анализа теплонапряженности деталей машин предложена и использована методика моделирования динамики систем тел со вспомогательными моделями теплопередачи в отдельных подсистемах.

Используемый метод позволяет включать в модели специфические взаимодействия и вспомогательные модели, например, качение эластичного колеса, железнодорожной колесной пары, теплопередачу, напряженно-деформированное состояние и т.д. Модели допускают включение контуров управления, необходимых для расчета эксплуатационных режимов работы машины. Используемый метод моделирования ориентирован на высокопроизводительные компьютеры.

Перечисленные особенности обуславливают основные черты методов представления уравнений движения, применяемых в системе моделирования динамики систем тел ФРУНД, а именно: возможность унификации задания расчетной схемы исследуемого объекта с помощью конечного множества типов составляющих элементов, простота автоматического формирования уравнений движения и программ для их интегрирования, гибкость при добавлении в систему новых видов специальных взаимодействий.

Одной из отличительных особенностей системы ФРУНД является возможность сравнения результатов экспериментальных и расчётных исследований.

Представление уравнений динамики систем тел основано на уравнениях Лагранжа первого рода. Уравнения динамики механической системы строятся из уравнений свободного движения тел и уравнений связей от кинематических пар. Кроме кинематических пар связи между телами могут задаваться силами от упругодемпфирующих элементов, соединяющих тела.

Технология моделирования, используемая в системе ФРУНД, ориентирована на решение задач динамики связанных систем твердых и упругих тел [3,5,6]. Модели такого класса характеризуются большим числом степеней свободы и связей. Для создания уравнений динамики таких моделей используются специальные автоматизированные методы, которые позволяют формировать уравнения движения и генерировать программу для их численного решения. Указанные методы не являются целью рассмотрения настоящей работы. Одной из существенных проблем в системах моделирования динамики являются методы анализа результатов решения. В частности, в случае случайного возмущения многомерной механической системы оценить качественные и количественные характеристики колебаний по характеристикам движения отдельных точек не всегда представляется возможным. Для анализа массивов экспериментальной информации в таких случаях используются специальные методы анализа [4], сводящиеся к возможности построения форм колебания на заданных частотах по временным реализациям. В настоящей работе рассматривается возможность такого анализа для экспериментальных и расчетных массивов данных по случайным колебаниям многомерных систем.

Как правило, в аналогичных системах моделирования используется построение спектров реализации колебательных процессов в характерных точках, что не дает возможности оценить адекватность математических моделей в случае их существенно больших размерностей.

#### **Анализ случайных колебаний**

Для представления результатов расчётов в форме, удобной для выявления качественных закономерностей случайных колебаний, в данной работе предлагается метод построения форм колебаний на заданной частоте по временным реализациям. Суть метода сводится к построению автоспектров характерных точек модели и взаимных спектров этих точек относительно одной базовой точки. Построение взаимных спектров даёт информацию о фазе колебаний текущей точки относительно базовой, а автоспектров – амплитуду колебаний. По амплитуде и фазе колебаний строятся анимационные изображения формы колебаний.

Предложенный метод апробирован на модели многоосного автомобиля, для которого были получены экспериментальные данные. Расчётные данные для этого автомобиля были получены с помощью компьютерной модели, общий вид расчетной схемы которой представлен на рисунке 1. Модель представляет собой набор твердых тел, соединенных упругими и демпфирующими элементами (пружинами, демпферами), а также различными кинематическими парами, в том числе и податливыми. На рисунке 2 изображена модель с САД-геометрией.

Каждое тело обладает 6 степенями свободы, всего модель содержит 68 тел. Считается, что ко всем телам расчетной схемы приложены силы веса. Возмущение от дороги воспринимается через шины, передающими в точке контакта три силы и один момент относительно вертикальной оси колеса – стабилизирующий момент шины.

Передняя подвеска состоит из верхних и нижних управляющих рычагов, маятниковых рычагов, ПГР, ступиц колес, редукторов.

Задняя подвеска является независимой и состоит из верхних и нижних управляющих рычагов, ПГР, ступиц колес, редукторов. Также она имеет фиксирующие тяги, которые соединяют ступицы колес с корпусом и не дают совершать колебания относительно рамы.

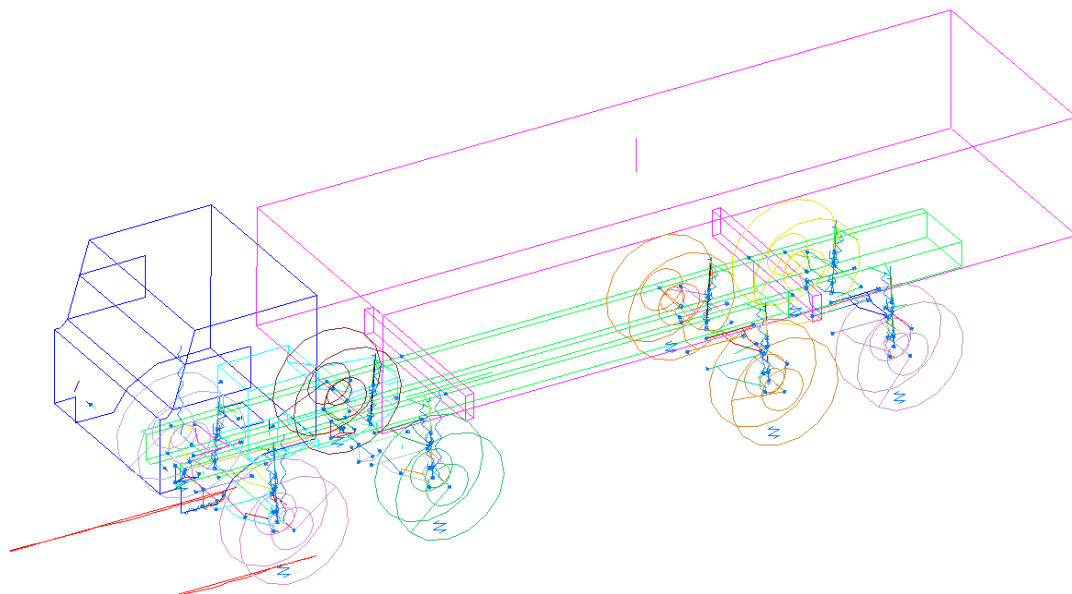


Рис. 1 – Расчетная схема автомобиля

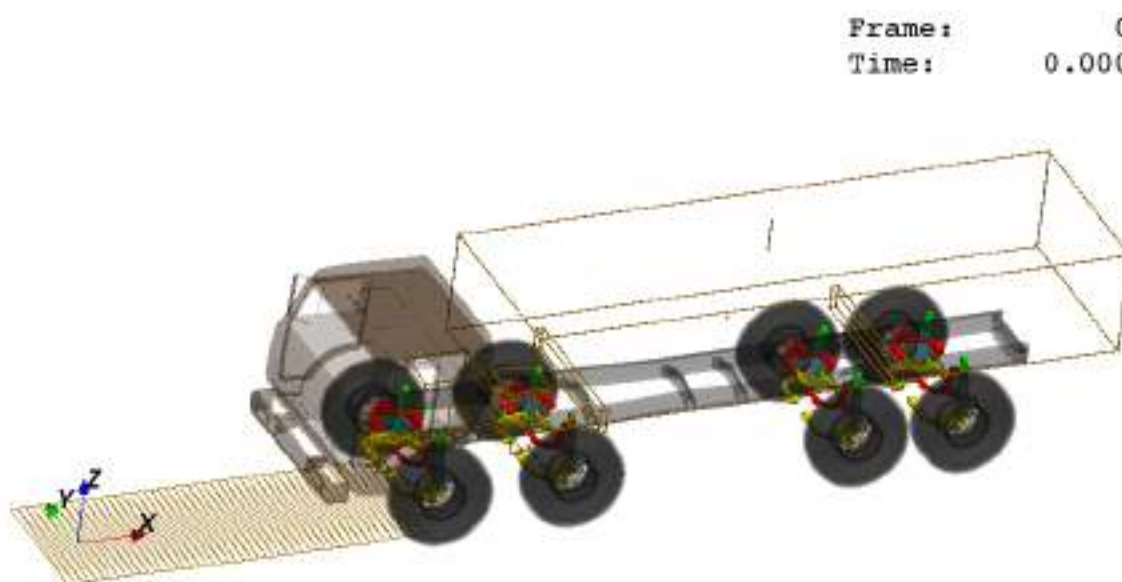


Рис. 2 – Модель автомобиля с CAD-геометрией

Для рассматриваемой модели показан пример графического представления обработки результатов экспериментальных замеров вертикальных ускорений в различных точках автомобиля. Точки расположения датчиков ускорений выбирались таким образом, чтобы получить представление о глобальных формах колебаний конструкции. На рисунках 3 и 4 показаны две формы колебаний – как твердого тела относительно поперечной оси – рисунок 3, и упругие колебания рамы – продольный изгиб первого тона – рисунок 4. Указанные экспериментальные результаты были использованы при построении подмодели рамы, автомобиля, состоящей из трех сегментов. Такая подмодель отражает упругие свойства рамы, связанные с изгибными

колебаниями второго тона.

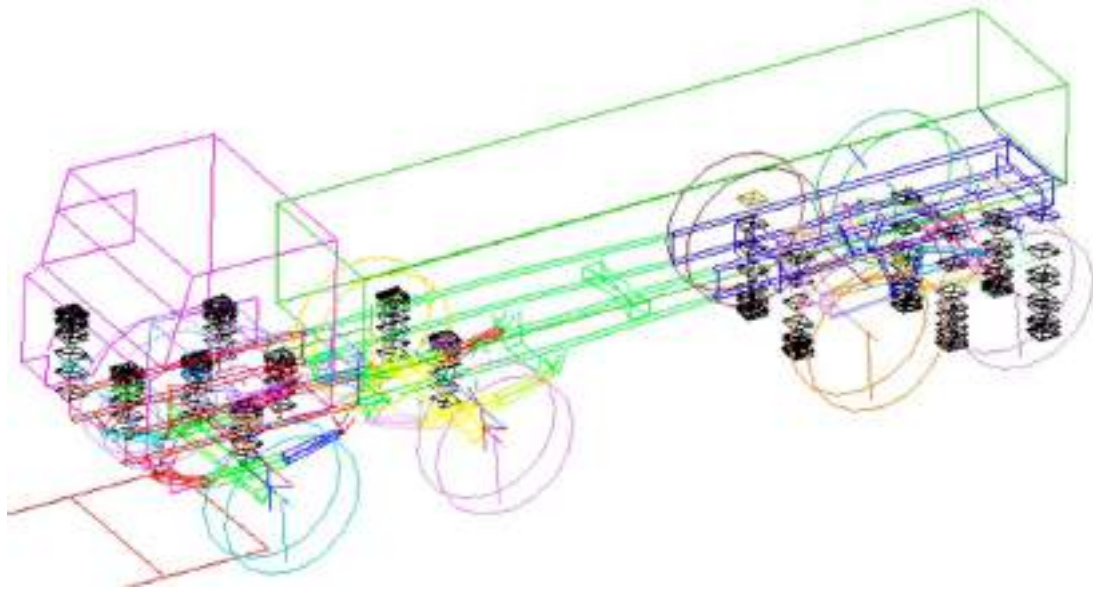


Рис. 3. Колебания автомобиля как твердого тела вокруг поперечной оси – частота 2.7 Гц

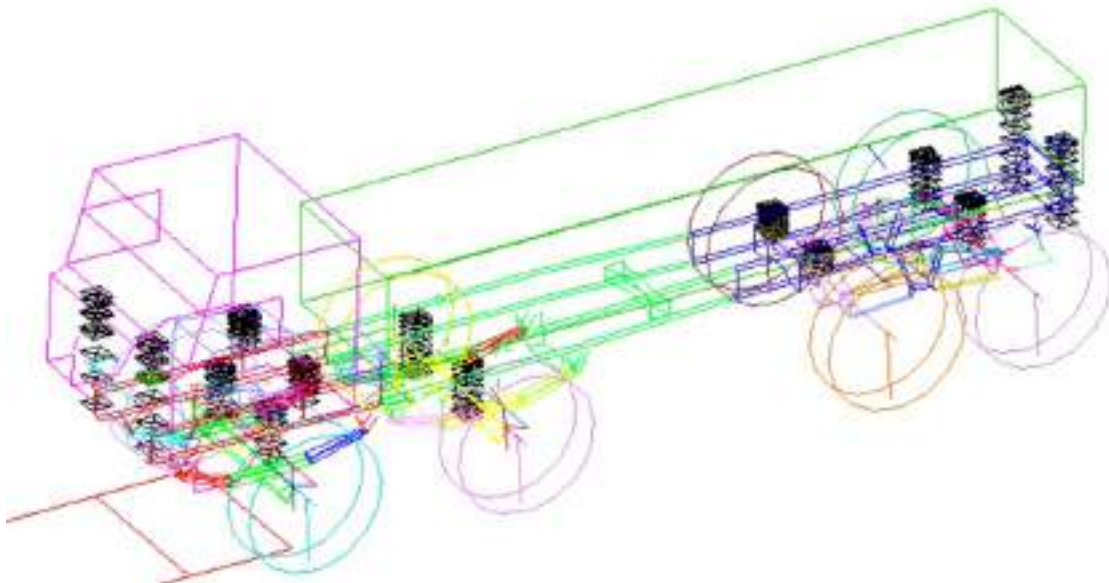


Рис. 4 – Продольные изгибные колебания рамы – частота 5 Гц

### Выводы

Представленный метод позволяет выявлять качественные закономерности в случайных колебаниях пространственных механических системах произвольной размерности, как для экспериментальных, так и для расчетных данных.

### Литература

1. Горобцов А.С., Карцов С.К., Плетнев А.Е., Поляков Ю.А. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей. М.: Машиностроение, 2011. 462 с.
2. Getmanski V.V., Gorobtsov A.S., Sergeev E.S. et al. Concurrent simulation of multibody systems coupled with stress-strain and heat transfer solvers // J. of Computational Science. 2012. V. 3 (6). P. 492-497.
3. O. Dmitrochenko, G. Mikheev, D. Pogorelov, R. Gandikota. A nonlinear finite element for simulation of dynamics of beam structures using multibody system approach. // 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI). July 20-25, 2014. Barcelona, Spain. P. 655-666.
4. Тараненко П.А., Шахринов В.Н., Кудрявцев О.А., Колкотин Д.А., Хрулев С.А., Ерпалов А.В. Расчетно-экспериментальный анализ собственных частот и форм элемента каркаса трамвайного вагона. // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. 2014. №2
5. Adams. The Multibody Dynamics Simulation Solution URL: <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (дата обращения: 25.09.2015).
6. Ефимов, Г.Б. Погорелов Д.Ю. Универсальный механизм – пакет программ для моделирования динамики систем многих твердых тел. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН №77. – М.: 1993.
7. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. – М.: Наука, 1988.