

**Бобылёв А.А., к.т.н., Коптовец А.Н., к.т.н.,
Ширин Л.Н., д.т.н., Яворская В.В., ассистент**
(Государственное ВУЗ "Национальный горный университет", г. Днепропетровск)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ШАХТНОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

Экспериментальные и теоретические исследования работы тормозных систем подвижного состава шахтного рельсового транспорта показали, что устойчивость процесса торможения в значительной степени определяется динамическими процессами в системе «колесо – тормозной механизм». Возможно возникновение фрикционных автоколебаний при взаимодействии нормальных и тангенциальных колебаний тормозной колодки.

Математическими моделями реальных тормозных систем являются сложные нелинейные многопараметрические динамические системы. Перспективным подходом к исследованию тормозных систем является применение компьютерного моделирования, однако возникают проблемы интерпретации и анализа результатов вычислительных экспериментов. Целесообразно использовать концепцию иерархии упрощенных моделей, характерной чертой которой является наличие базовых математических моделей [1]. Исследование базовых моделей позволяет, не проходя все ступени иерархии, осмыслить природу явлений в сложных системах. Для тормозных систем базовыми моделями являются простейшие автоколебательные системы с сухим трением.

В настоящей работе рассмотрены две простейшие автоколебательные системы. Первая система имеет две степени свободы и состоит из колодки, скользящей с трением по колесу, и упругодемпфирующего элемента Фойхта, моделирующего конструктивную связь тормозного механизма. Считается, что колодка и колесо абсолютно жесткие, однако каждая контактирующая поверхность покрыта деформируемым шероховатым слоем переменной толщины. В процессе относительного движения колодки и колеса происходит смятие микронеровностей. В первом приближении нормальная компонента локальных сил взаимодействия микронеровностей считается пропорциональной величине их взаимного перекрытия. Трение между контактирующими поверхностями описывается одночленным законом Амонтона.

Предложенная математическая модель применяется для исследования фрикционных автоколебаний, возникающих при торможении. Предполагается, что колесо вращается со скоростью, изменяющейся по заданному закону. Влияние тормозных усилий на скорость колеса не учитывается. Колодка может перемещаться в нормальном и тангенциальном относительно плоскости трения направлениях. Наличие в системе конструктивной связи, направленной к плоскости трения под углом, отличным от прямого, приводит к координатной взаимосвязи нормальных и тангенциальных колебаний колодки.

Вторая простейшая автоколебательная система имеет три степени свободы и применяется для моделирования процесса торможения поезда. Её отличие от первой системы состоит в учете изменения скорости поезда при торможении. Рассматриваются два взаимосвязанных динамических процесса: торможения поезда и колебаний колодки тормозного механизма. Получено уравнение движения поезда с учетом тормозных усилий. Для определения тормозных усилий с учетом влияния на процесс торможения нормальных и тангенциальных колебаний, возникающих в тормозном механизме, в качестве динамической модели колодочно-колесного тормоза используется рассмотренная выше автоколебательная система с двумя степенями свободы.

Рассмотренные динамические системы с законом трения Амонтона относятся к классу сильно нелинейных систем. Особенностью использованного в математических моделях закона трения является его «пороговый» характер: взаимное скольжение тел начинается не при любом значении силы трения, а лишь при достижении определенного порога. Отмеченная особенность значительно усложняет построение решений рассматриваемого класса динамических задач. Возможности аналитических методов их исследования, как правило, ограничены системами с одной степенью свободы. Поэтому актуальной является разработка вычислительных алгоритмов для компьютерного моделирования и анализа колебательных систем с трением методом вычислительного эксперимента.

Для разработки вычислительного алгоритма решения динамических задач с трением используется вариационный подход. Получены вариационные формулировки задач в виде квазивариационных неравенств. Дискретизация вариационных задач по времени производилась на основе двух- и трехслойных разностных схем. Для решения полученных на каждом шаге интегрирования по времени квазивариационных неравенств использовался итерационный процесс, позволяющий свести решение задачи к решению последовательности вариационных неравенств с недифференцируемыми слагаемыми, обусловленными наличием сил трения. Построены эквивалентные вариационным неравенствам с недифференцируемыми слагаемыми задачи минимизации, решение которых получено в явном виде.

Разработана методика численного исследования динамических процессов, состоящая из двух этапов. На первом этапе с использованием разработанного вычислительного алгоритма производится решение квазивариационного неравенства. В результате вычисляются временные ряды перемещений, скоростей и ускорений масс рассматриваемой системы.

На втором этапе выполняется анализ полученных временных рядов. Производится их визуализация, строятся фазовые диаграммы в переменных «перемещение-скорость». Для определения периода колебаний разработана процедура на основе анализа автокорреляционных функций. Далее строятся сечения Пуанкаре и выполняется спектральный анализ перемещений, скоростей и ускорений.

Выполнена верификация разработанных вычислительных алгоритмов. Анализ полученных численных результатов, а также их сравнение с известными результатами показали, что разработанные вычислительные алгоритмы позволяют эффективно исследовать основные закономерности динамических процессов в тормозных системах подвижного состава шахтного рельсового транспорта.

В результате вычислительных экспериментов установлено, что предложенные математические модели, учитывающие нормальные колебания колодки, вызванные шероховатостью контактирующих поверхностей и наличием конструктивной связи между нормальными и тангенциальными колебаниями, описывают возникновение фрикционных автоколебаний в тормозном механизме в случае, когда не вводится искусственная разница между статическим и динамическим коэффициентами трения.

Перечень ссылок

1. Малинецкий, Г. Г. Математические основы синергетики: Хаос, структуры, вычислительный эксперимент / Г. Г. Малинецкий. – 5-е изд. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 312 с.