

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА “УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ”

Д.Ю. Погорелов

Брянский государственный технический университет

Рассмотрены методы и алгоритмы моделирования динамики технических систем путем представления их системой абсолютно твердых и деформируемых тел с использованием программного комплекса “Универсальный механизм”. Обсуждаются методы создания моделей, автоматического формирования уравнений движения, численные методы их решения, формы представления и обработки результатов. Методы иллюстрируются примерами моделирования железнодорожных экипажей, гусеничных машин, плоских и пространственных механизмов и так далее.

## **Введение**

Исследование динамических свойств технических объектов, таких как транспортные экипажи (железнодорожные, автомобильные), машины и механизмы, космические аппараты сложной конфигурации, является необходимым и одним из наиболее важных этапов проектирования новых образцов, модификации старых или исследования нестандартных ситуаций (таких, как сход железнодорожного состава). Сложность динамического анализа заключается в невозможности точного аналитического исследования даже простых механических систем, поскольку динамика, как правило, описывается системами дифференциальных или дифференциально-алгебраических уравнений, в общем случае нелинейных, решение которых в явном виде получить невозможно. С другой стороны, само составление уравнений движения механических систем с большим числом степеней свободы может оказаться очень непростой процедурой. Это связано с ростом сложности выражений для кинематических величин, определяющих положение, скорости и ускорения тел, входящих в систему, при увеличении длины кинематических цепей.

Повышение требований к качеству проектируемых технических систем приводит к необходимости построения усложненных динамических моделей. С

одной стороны, это вызывает увеличение числа степеней свободы и, соответственно, приводит к упомянутым выше проблемам. С другой стороны, уточняются и усложняются математические модели сил взаимодействия тел, входящих в систему. Примерами могут служить силы взаимодействия железнодорожного колеса с рельсом и автомобильного колеса с дорогой. Компьютерная реализация моделей такого типа становится сложной проблемой.

Наконец, наблюдается тенденция к сокращению сроков, необходимых для создания новой техники.

Для решения перечисленных проблем с начала 60-х годов начата разработка программ, в которых исследуемый объект представляется системой абсолютно твердых или деформируемых тел, связанных кинематическими парами различных типов и силовыми элементами. В настоящее время на рынке программного обеспечения данное направление представлено довольно большим числом универсальных программ, например, MSC.ADAMS, LMS.DADS, SYMPACK, а также специализированных программ, ориентированных на конкретные объекты. Например, программы MEDYNA, NUCARS, Vampire ориентированы на моделирование динамики рельсовых экипажей. Все программы данного типа автоматизируют процесс формирования уравнений движения конкретной механической системы на основе описания инерционных, геометрических, кинематических параметров, моделей силовых взаимодействий, выбранных или заданных пользователем. Для дальнейшего исследования динамики объекта используются численные методы анализа уравнений движения, например, численное интегрирование.

В данной статье обсуждается использование программного комплекса “Универсальный механизм” (UM, [www.umlabor.ru](http://www.umlabor.ru)) для моделирования динамики технических систем. Рассмотрены особенности численных методов и алгоритмов, реализованных в этой программе, позволивших значительно ускорить как процесс создания компьютерных моделей сложных объектов, так и процесс численного анализа их динамики, по сравнению с приведенными выше аналогами.

## 1. Общие сведения о программном комплексе UM

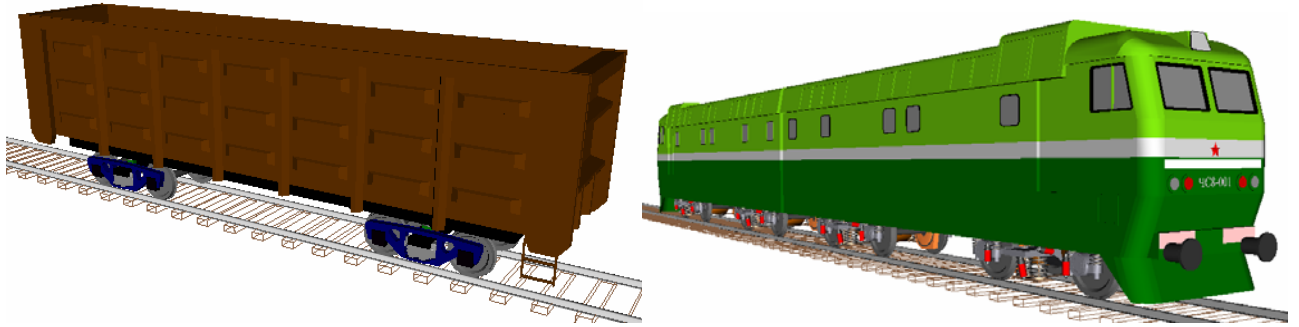


Рис.1. Компьютерные модели грузового полувагона и электровоза 2ЧС8

Программа UM разрабатывается в Брянском государственном техническом университете с конца 80-х годов прошлого столетия. Первоначально программа была ориентирована на моделирование общих систем абсолютно твердых тел без учета их особенностей. С 1992 года начата разработка модуля моделирования динамики рельсовых экипажей UM Loco, включающего современные модели взаимодействия колеса с рельсом и учитывающего другие особенности объекта исследования. К настоящему времени разработчиками UM Loco и пользователями программы созданы более 30 моделей электровозов, тепловозов, грузовых и пассажирских вагонов и других рельсовых экипажей [1,2], рис.1.

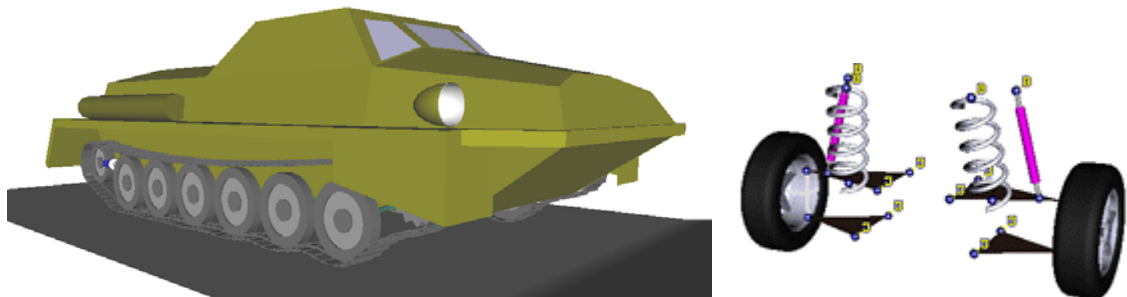


Рис.2. Модели гусеничного транспортера ТГ-Т и подвески автомобиля с двумя поперечными рычагами

В настоящее время программа UM включает несколько специализированных модулей моделирования динамики технических систем, таких как автомобили (UM Automotive), гусеничные машины (UM Caterpillar), рис.2, дискретные среды (UM Ballast). Расширение круга решаемых проблем достигается

также за счет создания интерфейса с программами МКЭ для моделирования гибридных систем, включающих как абсолютно твердые, так и деформируемые тела (UM FEM), развития в сотрудничестве с Южно-Русским государственным университетом средств моделирования электромеханических систем [3].

## **2. Принципы описания моделей технических систем как систем тел. Метод подсистем**

В основе моделирования динамики многих технических систем лежит их представление системой связанных тел. Для описания системы абсолютно твердых тел для каждого тела следует указать инерционные характеристики, то есть массу  $m_i$  и элементы тензора инерции  $J_i$ , где  $i$  – номер тела.

Наиболее универсальным способом задания списка координат системы является использование понятие шарнира как способа описания положения и возможных движений пары тел, одно из которых может быть неподвижная система координат (СК0). Например, вращательный шарнир, позволяющий одному телу в кинематической паре совершать вращательное движение относительно другого, вводит одну координату – угол поворота в шарнире, поступательный шарнир вводит линейную координату – сдвиг, а сферический шарнир – три координаты, соответствующие одному из набора углов ориентации (например, углы Кардано) [4]. Для свободного тела вводится шесть координат, определяющих его положение относительно СК0. В некоторых случаях сложного пространственного движения тела для задания его ориентации удобно использовать кватернион (параметры Эйлера), в отличие от углов ориентации не имеющих вырождения.

UM включает базу стандартных шарниров, имеющих любое число степеней свободы, что позволяет описать кинематическую схему плоских и пространственных механизмов практически любой сложности. В частности, для решения прямых и обратных задач кинематики можно задать нужным коорди-

натам любые явные зависимости от времени. Список координат объекта образуется как формальное объединение всех локальных шарнирных координат.

Особое значение имеет описание силовых элементов, определяющих взаимодействия пар тел. В UM реализована широкая база различных типов силовых элементов, достаточная для моделирования многих технических систем. В особо сложных случаях исследователь имеет возможность описать свой тип взаимодействия с использованием программирования в среде UM.

Каждому телу и некоторым силовым элементам (пружине, гасителю колебаний, поводку и т.д.) может быть назначен графический образ. Трехмерный графический образ может быть создан как средствами UM в виде набора стандартных графических элементов, так и импортирован из распространенных CAD программ, таких как КОМПАС, SolidWorks, AutoCAD. Все изображения моделей, приведенные в данной статье, получены с использованием стандартных средств UM.

Важнейшим элементом описания механической системы является полная параметризация модели. Для моделей UM это означает, что при задании всех инерционных, геометрических параметров, при описании моделей силовых элементов, а также при создании графических образов могут быть использованы идентификаторы и выражения.

Обсудим понятия подсистемы и метода подсистем, позволяющие значительно упростить создание моделей сложных технических систем, включающих сотни и даже тысячи элементов. *Подсистемой* может являться любой объект, описанный в UM. Часть силовых элементов и шарниров, входящих в состав подсистемы, могут быть описаны как *внешние*. Для внешних элементов в подсистеме задано только первое тело, а второе определено как *внешнее*, таким образом, данные элементы предназначены для установления связей и силовых взаимодействий между подсистемами.

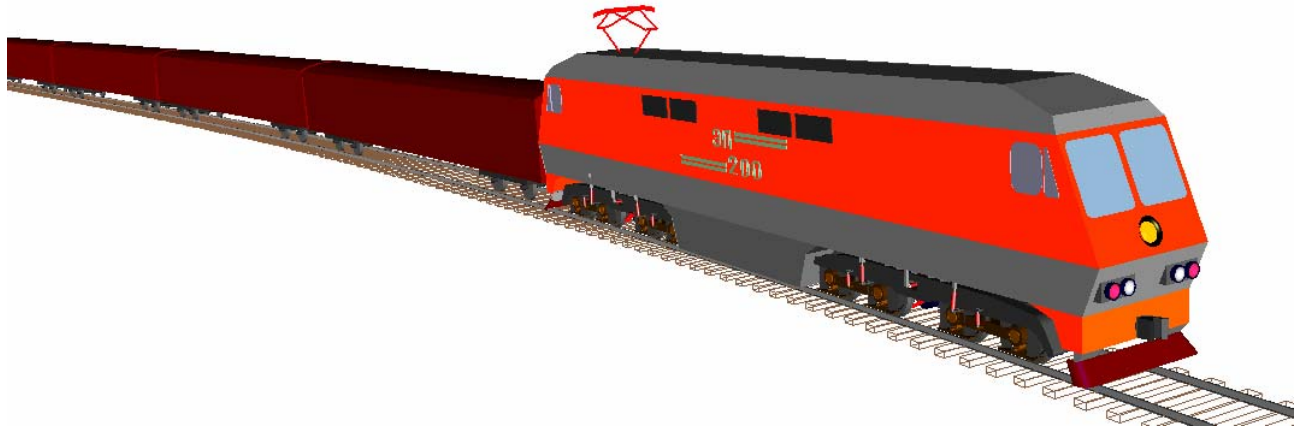


Рис.3. Модель пассажирского поезда как составного объекта

Любое число подсистем может быть добавлено к текущему объекту с помощью простой операции выбора соответствующих файлов, описывающих подсистемы. В результате объект получает статус *составного* (рис.3). При добавлении подсистемы ей может быть назначен статус либо *включенной*, либо *внешней*. Рассмотрим основные различия между данными типами подсистем.

Во-первых, в случае включенной подсистемы объект, ее содержащий, является владельцем всех элементов подсистемы (тел, шарниров и так далее); в случае внешней подсистемы объект лишь ссылается на нее и не владеет ее элементами. На практике это означает, что каждая включенная подсистема может редактироваться по отдельности, и, кроме того, все данные о подсистеме входят в файл описания текущего объекта. Например, пусть объект включает две первоначально совершенно одинаковые подсистемы. Это можно легко сделать, сначала добавив ее один раз, а потом применив операцию копирования. Затем каждая из подсистем может редактироваться произвольным образом: в подсистему можно добавить тело, шарнир, силовой элемент и так далее. После такой модификации подсистемы становятся различными по структуре, и все изменения будут записаны в файл данных объекта для каждой подсистемы. Напротив, если редактируется внешняя подсистема, то все изменения будут внесены во все объекты, которые содержат данную подсистему в качестве внешней.

Во-вторых, имеются существенные различия в формировании уравнений движения включенной и внешней подсистем, которые здесь обсуждаться не будут.

После добавления как внешней, так и включенной подсистемы с ней можно выполнить следующие действия [5]: задать ее положение и ориентацию относительно базовой системы координат составного объекта; задать внешним элементам вторые тела путем назначения предварительно введенных точек связей; ввести новые шарниры и силовые элементы, связывающие тела подсистемы как с одним из тел объекта, так и с телом любой другой подсистемы.

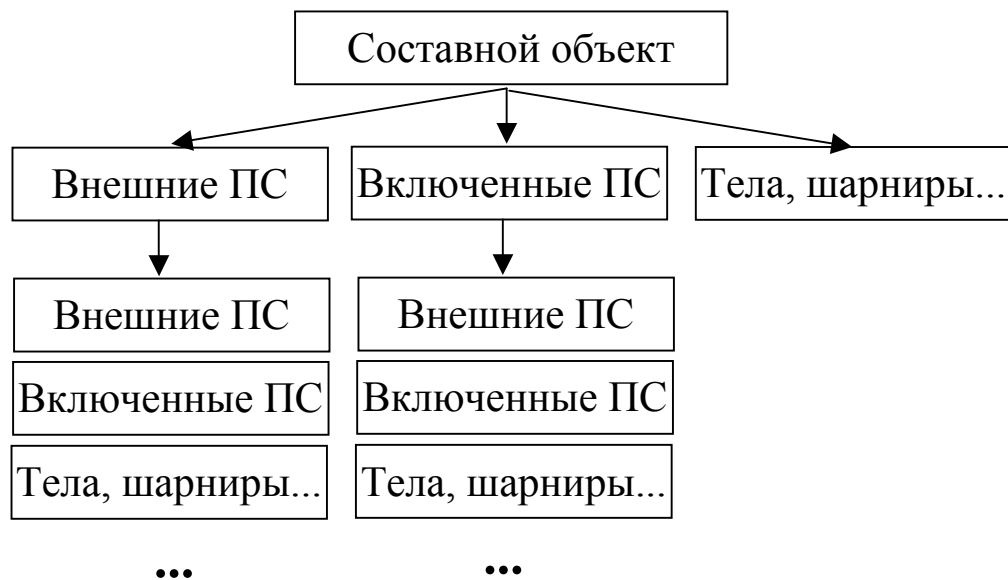


Рис.4. Структура представления составного объекта деревом внешних и включенных подсистем

Поскольку каждая подсистемы может, в свою очередь, содержать любое число как внешних, так и включенных подсистем, то модель объекта в общем случае может быть представлена деревом подсистем (рис.4).

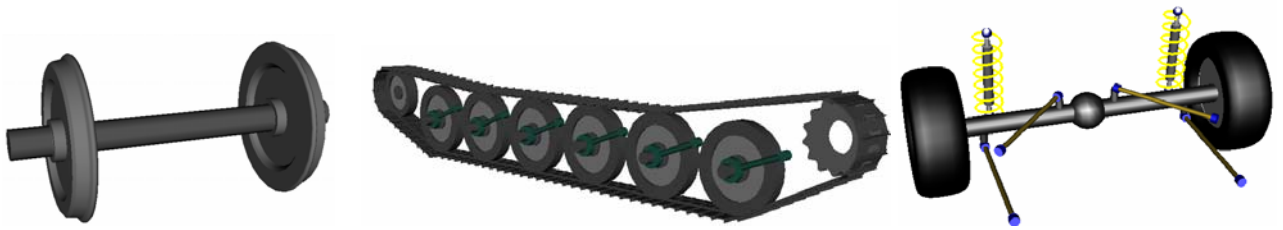


Рис.5. Стандартные подсистемы

Метод подсистем является основой разработки специализированных модулей UM путем создания стандартных подсистем (рис.5). Например, стандартная подсистема – колесная пара является основой моделирования железнодорожных экипажей. Моделирование гусеничных машин связано со стандартной подсистемой - гусеницей, при добавлении которой автоматизируются наиболее сложные операции по синтезу элементов подсистемы: пользователь задает число опорных катков, их положения и параметры, тип подвески (например, торсион), число траков и другие параметры, в то время как сама подсистема с указанными характеристиками будет сгенерирована динамически. В основе моделирования динамики автомобиля лежит, наряду с моделью пневматика, набор стандартных подсистем, соответствующих типовым подвескам автомобиля (с двумя поперечными рычагами, подвеска на направляющих пружинах и амортизационных стойках и так далее). Поскольку подсистемы полностью параметризованы и открыты для модификации, легко учесть конкретные особенности конструкции. Конечно, с помощью описанного метода пользователь может добавлять подсистемы для собственных конструкций и создавать базы данных типовых узлов и элементов.

Метод подсистем предоставляет пользователю удобный интерфейс работы с идентификаторами. Поскольку идентификаторы разных подсистем могут принимать различные значения, то как внешние, так и внутренние подсистемы, формально тождественные, могут моделировать различные типы объектов. Например, созданная в UM полностью параметризованная модель вагона с трехэлементными тележками может быть использована для исследования динамики полувагона, цистерны, хоппера, грузовой платформы и т.д., причем как в по-

рожном, так и груженом состояниях, в номинальном состоянии и с отклонениями (например, вследствие износа). Включая в модель железнодорожного состава данную подсистему нужное число раз и меняя значения идентификаторов в отдельных подсистемах, можно получить любую конфигурацию состава.

При описании модели в виде многоуровневого дерева подсистем все элементы получают длинные имена, упрощающие идентификацию необходимого элемента, например, *Состав.Тепловоз.Тележка2.Гаситель1Л*.

### 3. Уравнения движения

Кратко остановимся на алгоритмах формирования уравнений движения. Сначала рассмотрим соотношения кинематики, то есть зависимости положений, скоростей и ускорений тел от набора координат  $q$  и первых двух производных от координат по времени  $\dot{q}, \ddot{q}$  (для простоты ограничимся случаем стационарных связей):

$$\begin{aligned} r_i &= r_i(q), A_{0i} = A_{0i}(q), v_i = D_i(q)\dot{q}, \omega_i = B_i(q)\dot{q}, \\ a_i &= D_i(q)\ddot{q} + a'_i(q, \dot{q}), \varepsilon_i = B_i(q)\ddot{q} + \varepsilon'_i(q, \dot{q}). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $r_i, A_{0i}$  – радиус-вектор начала отсчета и матрица направляющих косинусов системы координат, связанной с телом  $i$ ,  $v_i, \omega_i, a_i, \varepsilon_i$  – линейные и угловые скорости и ускорения. Матрицы  $D_i$  и  $B_i$  получаются в результате вычисления производных от  $r_i, A_{0i}$ . Соотношения (1) записаны в матричном виде. Для всех типов шарниров, указанных в п.2, эти соотношения могут быть получены в явном виде с использованием известной рекурсивной процедуры [4].

Предполагая, что начала отсчета связанных с телами систем координат помещены в центрах масс, с использованием теорем о движении центра масс и об изменении момента количества движения для каждого тела, можно получить уравнения движения произвольной системы тел, стесненной голономными связями, в следующем виде:

$$M(q, t)\ddot{q} + k(q, \dot{q}) = Q(q, \dot{q}) + G(q)\lambda, \quad (2)$$

$$g(q) = 0, \quad G = \partial g / \partial q^T.$$

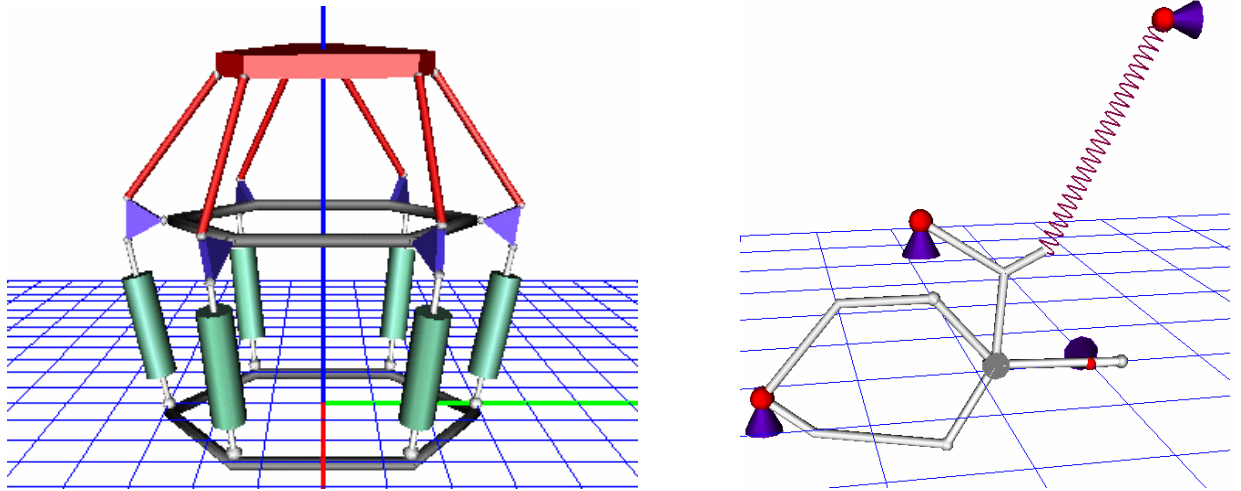


Рис.6. Модели пространственного (стенд для динамических испытаний) и плоского (пресс) механизмов с замкнутыми кинематическими цепями

Уравнения (2) являются дифференциально-алгебраическими в случае, когда механическая система имеет замкнутые кинематические цепи (рис.6), второе уравнение системы (2) соответствует условиям замыкания разрезанных шарнирах в замкнутых цепях.

В соответствии с алгоритмом формирования уравнений движения (2), элементы всех матриц, входящих в уравнения, при известных кинематических соотношениях (1) имеют вид несложных матричных выражений. Например, для матрицы масс имеем

$$M = \sum_i \left( m_i D_i^T D_i + B_i^T J_i B_i \right),$$

где суммирование распространяется на все тела системы. Аналогичные соотношения справедливы и для других матриц.

Алгоритм формирования элементов уравнений (2) включает лишь операции умножения и сложения и не требует вычисления частных производных, как в случае уравнений Лагранжа II рода. Можно показать, что и зависимости (1) могут быть получены только с использованием операций сложения, умножения

и вычисления тригонометрических функций. Данная особенность приведенного алгоритма позволяет использовать его для автоматизированного (компьютерного) формирования уравнений движения. При этом его программная реализация может быть выполнена как в виде численно-итерационного формирования уравнений движения (т.е. расчет элементов уравнений движения, включая элементы матрицы масс и сил инерции на каждом шаге интегрирования), так и в полной символьной форме. Синтез уравнений в символьной форме означает, что элементы уравнений движения формируются в виде выражений на одном из языков программирования с использованием систем автоматизированных выкладок (САВ), а затем компилируются в виде динамически связываемой библиотеки (dll).

Формирование уравнений движения в символьной форме имеет значительные преимущества по быстродействию процесса моделирования, а численно – итерационные алгоритмы позволяют проще организовывать моделирование систем с переменной структурой. Поэтому в программе УМ реализованы оба подхода, причем при выводе символьных уравнений используется встроенная специализированная САВ, формирующая уравнения движения на языках Паскаль или С [6].

Рассмотрим особенности уравнений движения в случае, когда модель объекта представлена набором внешних подсистем, связанных силовыми взаимодействиями. В этом случае уравнения движения имеют блочную структуру

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + k_i(q_i, \dot{q}_i) = Q_i(q_i, \dot{q}_i, t) + \sum_j Q_{ij}(q_i, \dot{q}_i, q_j, \dot{q}_j, t) + G_i^T(q_i)\lambda_i,$$

$$g_i(q_i) = 0,$$

где  $i=1, \dots, N$  – индекс подсистемы. Ясно, что почти все расчеты для подсистемы, включая расчет элементов уравнений движения и их решение, могут быть выполнены в виде отдельного процесса. Коммуникация между процессами необходима для получения внешних сил взаимодействия между подсистемами, входящими в обобщенные силы  $Q_{ij}$ , а также для анализа результатов выполнения шага интегрирования с целью выполнения анализа: принят или отвергнут

шаг, а также следует ли увеличить шаг интегрирования. Таким образом, метод подсистем в данном случае дает практически идеальную возможность для реализации распределенных расчетов с использованием локальной компьютерной сети (соответствующая версия UM находится в стадии разработки).

Более того, при моделировании систем с длинными кинематическими цепями метод подсистем используется для оптимизации процесса моделирования с целью минимизации времени ЦПУ, учитывая указанную блочную структуру уравнений [7]. Метод позволяет моделировать системы, содержащие сотни и даже тысячи тел. Такой подход был использован для моделирования с помощью UM динамики якорных систем морских платформ [8].

В UM реализованы три алгоритма формирования уравнений движения, различающиеся по числу арифметических операций, необходимых для формирования уравнений движения: прямой метод, методы составных и сопряженных тел. Для каждого конкретного моделируемого объекта наиболее эффективным является один из этих методов. Например, при моделировании динамики рельсовых экипажей наиболее эффективен прямой метод. Для систем со структурой дерева (то есть без замкнутых кинематических цепей) с очень длинными кинематическими цепями самым быстрым является метод сопряженных тел. Для остальных объектов, как правило, быстрее всех – метод составных тел. В UM реализована процедура автоматического определения наиболее эффективного алгоритма. Более того, для различных внешних подсистем в пределах одного объекта могут быть выбраны разные методы. Этот подход не имеет аналогов среди программ моделирования динамики систем тел, и это одна из причин, объясняющих высокое быстродействие UM. Сравним быстродействие UM Loco с ADAMS/Rail на примере манчестерских тестов, представляющих собой упрощенные модели пассажирского и грузового вагонов, разработанные для сравнения различных программ моделирования динамики рельсовых экипажей. При близких количественных значениях результатов моделирования во всех тестовых примерах UM показал большее быстродействие, причем в некоторых случаях преимущество достигало от десяти- до двадцатикратного. Подробную ин-

формацию о результатах тестирования UM Loco можно найти на сайте [www.umlab.ru](http://www.umlab.ru).

#### 4. Моделирование динамики: численные методы

Целью численного анализа модели технической системы является исследование ее свойств с использованием построенной компьютерной (или виртуальной) модели. Основным инструментом анализа – численное интегрирование нелинейных уравнений движения. В программном комплексе UM реализованы численные методы интегрирования дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ), разработанные автором статьи [5,9,10]: явные многозначные методы Адамса-Бэшфорда-Моултона и BDF (формула дифференцирования назад), осуществляющие интегрирование с автоматическим выбором шага и порядка метода, а также неявные многошаговые методы Парка и Гира. Последние два метода также используют контроль шага для предотвращения выброса ШМ. Они эффективны при решении нежестких уравнений и отличаются от известных аналогов высокой скоростью, поскольку являются безытерационными методами решения ДАУ.

Методы Парка и Гира используются для решения жестких уравнений, то есть уравнений, в которых, наряду с медленными процессами, есть очень быстро протекающие процессы, строгое определение понятия жесткости можно найти, например, в работе [11]. Использование для таких уравнений явных численных методов часто невозможно из-за очень маленького шага интегрирования. Модели многих сложных технических системы являются жесткими благодаря тому, что в них присутствуют силовые взаимодействия, быстро меняющиеся по величине при незначительных относительных смещениях взаимодействующих тел и/или при незначительном изменении относительных скоростей. В математическом плане это означает, что матрица частных производных от соответствующих сил по обобщенным координатам и обобщенным скоростям (матрица Якоби силы) имеет большую норму, то есть матрица содержит боль-

шие по величине элементы. Типичным примером жесткого силового взаимодействия является контакт между парой тел. Матрица Якоби такой силы содержит коэффициенты контактной жесткости и диссипации, которые могут принимать очень большие значения.

При использовании неявных численных методов для интегрирования жестких дифференциальных уравнений на каждом шаге интегрирования решается система нелинейных алгебраических уравнений. Наиболее быстрым способом решения нелинейных уравнений является метод Ньютона, который использует матрицу Якоби уравнений, то есть матрицу частных производных от элементов уравнений движения по обобщенным координатам и обобщенным скоростям. Расчет матриц Якоби для сложных динамических систем методом конечных разностей, как правило, требует очень большого числа арифметических операций, во много раз превышающего число операций, необходимых для расчета собственно элементов уравнений движения. Для ускорения данной процедуры автором статьи предложен метод расчета приближенных матриц Якоби и получены соответствующие аналитические выражения [10,12]. Основная идея заключается в том, чтобы в выражениях для частных производных учитывать только ведущие члены обобщенных сил, соответствующие жестким силовым элементам. Разработанная методика реализована в УМ. В результате вычислительные затраты на расчет матриц Якоби, как правило, не превышают затрат на оценку элементов уравнений движения, что является одним из важнейших факторов преимущества УМ по быстродействию в сравнении с другими программами.

Наряду с численным интегрированием уравнений движения, в УМ предусмотрены другие способы анализа уравнений движения: поиск положение равновесия и анализ их устойчивости; линеаризация уравнений в окрестности положений равновесия и стационарных движений и традиционный анализ линеаризованных уравнений (расчет собственных частот и форм колебаний, определение корней характеристических уравнений и соответствующих собственных векторов, построение корневых годографов и так далее).

## 5. Моделирование динамики: представление и обработка результатов

Скорость, качество и полнота исследования динамики технических систем в значительной мере определяется способами получения, представления и обработки результатов моделирования. Рассмотрим набор инструментов, реализованных в программе UM для этой цели.

Специальный инструмент позволяет создать для каждой модели список переменных, которые характеризуют его динамические показатели. К переменным могут относиться

- кинематические характеристики: траектории, координаты, скорости, ускорения любой точки любого тела, углы поворотов, угловые скорости и угловые ускорения тел, характеристики относительного движения тел;
- силы реакций в шарнирах;
- активные силы (силы, задаваемые с помощью силового элемента, например, усилие в пружине).

Векторные величины могут быть представлены в проекции на оси системы координат, связанной с любым телом объекта.

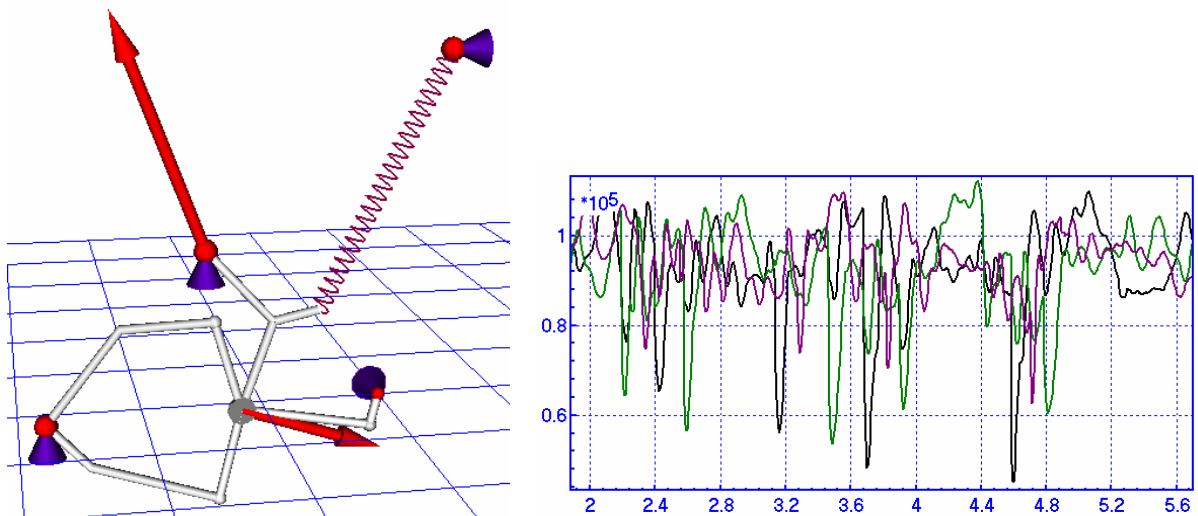


Рис.7. Анимационное и графическое окна

В отличие от большинства программ моделирования динамики систем тел, УМ предоставляет пользователю возможность получать визуальную информацию о движении объекта и о его динамических и кинематических характеристиках непосредственно в процессе моделирования, а не после того, как интегрирование уравнений будет закончено. Для визуального представления результатов используются анимационное и графическое окна (рис.7). Пользователь имеет возможность открыть любое число окон каждого типа. В анимационном окне отображается пространственное движение модели, можно построить векторы сил и моментов (активных, реакции, инерции), линейных и угловых скоростей и ускорений, траектории точек. В графическом окне строятся графики скалярных переменных любого типа, число переменных в пределах одного графика не ограничено. Предусмотрен экспорт переменных из графического окна в MS Excel.

Одна из форм хранения результатов расчета – создание файлов зависимостей от времени переменных, включенных в список.

Для обработки результатов моделирования используются низкочастотная, высокочастотная и другие типы фильтрации, а также два основных инструмента: табличный процессор и окно статистики. С использованием табличного процессора к переменным можно применить как стандартные функционалы (определение минимальных, максимальных значений, СКО и так далее), так и функционалы, разработанные пользователем. В окне статистики к переменной применяются преобразования для получения спектральной плотности мощности, модуля, фазы спектра и так далее.

В рамках специализированных модулей предусмотрены специфические переменные и средства представления и обработки результатов. Например, в модуле моделирования динамики железнодорожных экипажей УМ Loco дополнительно к стандартным переменным, перечисленным выше, в распоряжение исследователя предоставляется более 50 дополнительных переменных для каждого колеса, характеризующих его взаимодействие с рельсом. Разработаны инструменты задания профилей колес и рельсов, неровностей рельсовых нитей,

окно анимационного отображения процессов контакта колеса с рельсом и так далее.

При исследовании динамики технических систем большое значение имеет анализ зависимостей характерных переменных от параметров модели. Например, максимальные значения горизонтальных и вертикальных ускорений в кабине машиниста локомотива в зависимости от параметров системы подвески (коэффициенты жесткости пружин и параметры гасителей) при различных скоростях движения локомотива. Для получения таких результатов в УМ разработан специальный модуль планирования и выполнения многовариантных расчетов (сканирования) и оптимизации – УМ Optimization. План эксперимента может включать расчет динамики модели в заданных узловых точках пространства параметров любой размерности. Здесь учитывается возможность параметризации объекта, то есть в качестве сканируемых параметров используются идентификаторы, введенные при описании модели. Пример задания: выполнить расчеты для двух модификаций локомотива при скорости 10, 15, 20, 25 м/с для значений коэффициента жесткости пружин первой ступени подвески 5,6,7,8 кН/мм. Данное задание соответствует  $2 \times 4 \times 4 = 32$  расчетам. Число экспериментов не ограничено. Например, с использованием УМ проводились эксперименты, число расчетов в которых достигало нескольких тысяч. Методика планирования экспериментов предусматривает использование заранее подготовленного списка переменных, зависимости которых от времени сохраняются для каждого из расчетов.

Для повышения скорости сканирования разработан модуль UM Cluster, позволяющий вовлекать в расчеты локальную компьютерную сеть.

Для обработки огромного количества информации, получаемой в результате сканирования, разработаны эффективные средства анализа результатов зависимостей от изменяемых параметров в табличной форме, в виде графиков и поверхностей.

Реализованы также классические методы параметрической оптимизации объекта в соответствии с заданной целевой функцией и новейшие методы мно-

гокритериальной оптимизации, такие как метод анализа иерархий и генетический алгоритм.

Описанный аппарат позволил группе инженеров-исследователей Брянского государственного технического университета в 2004 году в кратчайшие сроки выполнить работы по выбору рациональных параметров ходовой части проектируемых тепловоза ТЭ25 и электровозов ЭП2, 2ЭС4К.

## **6. Моделирование гибридных систем**

Под гибридными системами в данном разделе подразумеваются механические системы, состоящие из абсолютно твердых и деформируемых тел. Для моделирования упругих тел в УМ может быть использовано два подхода. Первый из них состоит в замене упругого тела системой абсолютно твердых тел, связанных друг с другом линейными упруго-диссипативными связями. Данный подход хорошо зарекомендовал себя, например, при моделировании динамики упругих балочных конструкций.

Другой, более общий подход, применяется с использованием конечно-элементных моделей тел. В УМ реализован так называемый модальный подход с использованием плавающей системы координат. Подход состоит в том, что из программы МКЭ импортируется набор статических и динамических форм упругого тела, число которых определяется конкретной задачей, но в любом случае много меньше числа степеней свободы модели МКЭ. Эти формы определяют упругие степени свободы тела в рамках гибридной модели. При использовании метода плавающей системы координат упругие тела в гибридной модели могут совершать произвольные пространственные движения при условии, что деформации остаются малыми. Упругие тела могут соединяться с другими телами (как упругими, так и абсолютно твердыми) произвольными шарнирами и силовыми элементами. В настоящее время реализован интерфейс с программой МКЭ ANSYS, в процессе развития интерфейс с MSC.Nastran

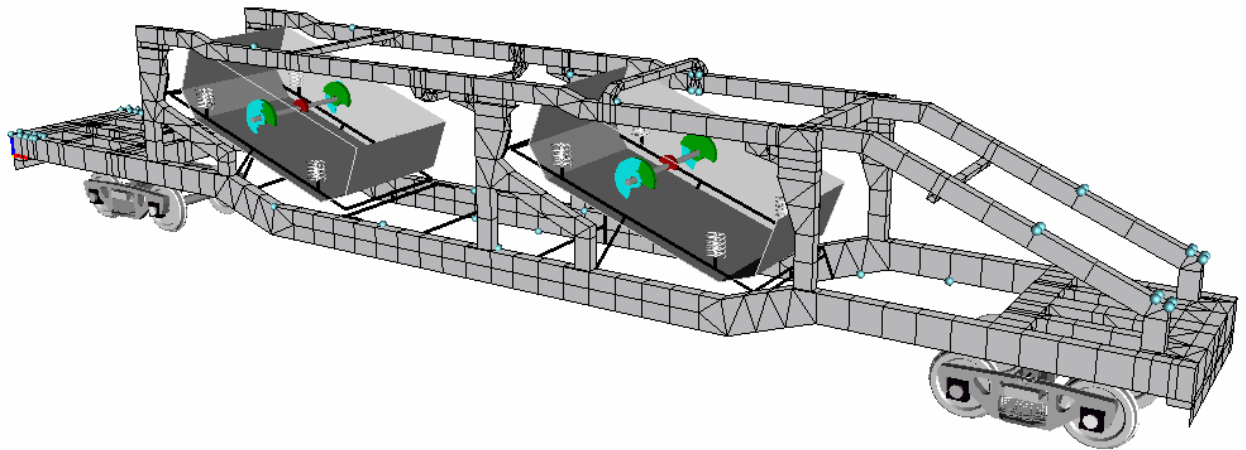


Рис.8. Гибридная модель щебнеочистительной машины ЩОМ-1200

На рис.8 приведена гибридная модель щебнеочистительной машины, в которой грохоты представлены системами абсолютно твердых тел, а рама является упругой. Модель использовалась для исследования вибраций рамы при переходных режимах работы грохотов.

#### Список литературы

1. Михальченко Г.С., Погорелов Д.Ю., Симонов В.А. Совершенствование динамических качеств подвижного состава железных дорог средствами компьютерного моделирования // Тяжелое машиностроение. – 2003. – №12. – С. 2-6.
2. R. Kovalev, V.N. Yazykov, G.S. Mikhailchenko, and D. Yu. Pogorelov. Railway Vehicle Dynamics: Some Aspects of Wheel-Rail Contact Modeling and Optimization of Running Gears // Mechanics Based Design of Structures and Machines.–2003.–V. 31.– Nr. 3. – pp. 315-335.
3. Kolpakhchyan P., Pogorelov D. Simulation of electric locomotives as mechatronic systems// EUROMECH 452, Advances in Simulation Techniques for Applied Dynamics. Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Germany, March 1-4, 2004. (<http://cantor1.mathematik.uni-halle.de/euromech452/papers/pogorelov.pdf>)
4. Погорелов Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел. Брянск: БГТУ. 1997. 156с.
5. Pogorelov D. Yu. On numerical methods of modeling large multibody systems // Mech. and Mash. Theory. –1999.–V. 34. – pp. 791-800.
6. Погорелов Д.Ю. О кодировании символьных выражений при синтезе уравнений движения системы твердых тел // Техн. киберн.–1993.–№6.–С.207-213.

7. Ефимов Г.Б., Погорелов Д.Ю. О численных методах моделирования движения системы твердых тел. Препр. Ин. прикл. матем. РАН.–1994.–№12.
8. Kreuzer E., Wilke U. Mooring Systems – A Multibody Dynamic Approach // Multibody System Dynamics. –2002.–Nr 8. – pp.279-297.
9. Погорелов Д.Ю. О численных методах моделирования движения системы твердых тел // ЖВМиМФ.–1995.–№4.–С.631-638.
10. Pogorelov D. Differential-algebraic equations in multibody system modeling // Numerical algorithms. –1998. –V.19. – pp. 183-194.
11. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / Под ред. Дж. Холла, Дж. Уатта. М.: Мир. 1989.
12. Pogorelov D. On Calculation of Jacobian Matrices in Simulation of Multibody Systems, Preprints of the NATO Advanced Study Institute on Virtual Nonlinear Multibody Systems. v.1. Edited by W. Schiehlen and M. Valasek.–Czech Technical University in Prague, Prague, June 23. – July 3.–2002.– pp. 159-164.