

РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ СИСТЕМ ТВЕРДЫХ И УПРУГИХ ТЕЛ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ФРУНД

А.С. Горобцов, С.В. Солоденков



**ГОРОБЦОВ
Александр
Сергеевич**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Волгоградского технического университета. Специалист в области компьютерного моделирования динамики пространственных механических систем. Автор более 90 научных трудов, в том числе 1 монографии.

динамики приводят к постоянному усложнению расчетных схем машин как за счет увеличения размерности, так и за счет введения в них описаний приводов, систем управления, различных специальных взаимодействий, например, качения эластичного колеса и т.д. Можно утверждать, что динамические модели имеют интегральный характер и в том или ином виде несут в себе информацию о большей части эксплуатационных показателей объекта.

Методы расчета динамики, как правило, реализованы в универсальных программных комплексах, совмещающих в себе функции конструирования самих дифференциальных уравнений движения и их численного интегрирования. Перечисленные свойства в той или иной мере при-

Введение

Анализ динамики и кинематики механизмов и машин занимает важное место в технологиях проектирования, поскольку, с одной стороны, существенно влияет на эксплуатационные параметры традиционных кинематических схем машин, а с другой – в значительной степени определяет возможности создания новых типов машин.

Среди программ инженерных расчетов программные комплексы расчета динамики машин являются одними из самых сложных и требовательных к аппаратным ресурсам. Возрастающие требования к эффективности моделирования



**СОЛОДЕНКОВ
Сергей
Владимирович**

Кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и гидравлики Волгоградского технического университета. Специалист в области многомерных систем автоматического управления. Автор более 40 научных трудов.

сущи различным существующим отечественным и зарубежным комплексам моделирования динамики систем тел – UM, EULER, PRADIS, ADAMS, DADS и др. [1–5]. Однако, несмотря на большое количество методов и программных комплексов, задачи эффективного моделирования механических систем твердых и упругих тел произвольной структуры и большой размерности не могут считаться решенными, и разработка новых подходов является актуальной.

Обзор существующих методов в динамике систем многих тел

В настоящее время используется два различных представления уравнений движения в динамике систем многих тел: с помощью абсолютных координат, например EULER, ADAMS, и относительных – UM, PRADIS и др. Применение абсолютных координат сочетается с использованием неявных формул численного интегрирования, что позволяет решать возникающую систему дифференциально-алгебраических уравнений. Достоинством этого метода является рассмотрение систем общего вида как со структурой дерева, так и с замкнутыми циклами. Уравнения движения, записанные в относительных координатах, обладают меньшей размерностью, однако выводятся только для систем со структурой дерева, что ведет к необходимости в общем случае введения замыкающих связей и, как следствие, применения неявных формул интегрирования.

Неявные методы интегрирования хотя и обладают большей устойчивостью, однако требуют более сложного задания нелинейных характеристик позиционных и диссипативных сил, а также уступают явным методам по некоторым вычислительным параметрам – малому затуханию ошибки и т.д.

Для учета упругих свойств тел в большинстве случаев используются методы дискретизации, в частности, метод конечных элементов (МКЭ), для чего применяются встроенные МКЭ-решатели или необходимые данные импортируются из специализированных комплексов. Встроенные решатели обладают ограниченными воз-

можностями (PRADIS, ADAMS), однако удобны в случае тел относительно несложной формы, например элементов подвески автомобилей, деталей двигателя и т.д. Упругие свойства несущих конструкций – рам, кузовов целесообразно получать из специализированных комплексов МКЭ (ADAMS).

Можно констатировать, что существующие универсальные расчетные методы динамики систем тел, реализованные в известных программных комплексах, сводятся к решению жестких дифференциальных уравнений. Тем не менее, методы численного моделирования динамики, основанные на представлении движения относительно мягкими дифференциальными уравнениями, обладают определенными преимуществами – простыми способами описания нелинейностей, явными формулами численного интегрирования, и, в конечном счете, большим быстродействием. Поэтому разработку универсального комплекса моделирования динамики, базирующегося на решении мягких уравнений движения, можно считать оправданным.

Представление моделей в системе моделирования ФРУНД

В программной системе моделирования ФРУНД (формирование и решение уравнений нелинейной динамики) [6], в качестве базового представления дифференциальных уравнений движения использованы уравнения Лагранжа 1-го рода с записью уравнений кинематических связей во вторых производных. Разработаны способы задания уравнений связей высших и низших кинематических пар различных классов. Особенности численного интегрирования таких уравнений и способы регуляризации, обеспечивающие численную устойчивость, обсуждались в работе [7].

Снижение жесткости дифференциальных уравнений движения в рассматриваемом методе достигается за счет следующих основных факторов: совместного нахождения реакций от кинематических связей и ускорений системы тел, представления упругих свойств тел в виде ограниченного ряда собственных частот и форм, в

том числе форм движения как твердого тела, использования для расчета ударных взаимодействий теории системного удара [8]. На расчетную схему исследуемого объекта не накладываются структурных ограничений, кроме избыточных связей, которые диагностируются в процессе решения и могут быть исключены путем эквивалентных преобразований.

Для описания модели используются несколько базовых элементов, к которым отнесены:

- подсистема – твердое или упругое тело, совершающее большие или малые движения, а также элементы контуров управления – двухполюсники и многополюсники;
- механическая характеристика – спецификация функций, определяющих силовое взаимодействие между двумя точками разных тел;
- соединительный элемент, определяющий топологию связи между двумя телами и содержащий ссылку на механическую характеристику;
- характеристика специальной силы (нагрузка) – спецификация функций, задающих силовое воздействие на точку тела;
- специальная сила (нагрузка), определяющая топологию силового воздействия на точку тела и содержащая ссылку на характеристику специальной силы;
- макроопределение (макрос) – параметризованное описание модели на основе вышеперечисленных структур и других макросов.

Кроме этих основных структур используется несколько вспомогательных, предназначенных для задания кинематического возмущения, которые необходимы при моделировании транспортных средств.

Программный комплекс ФРУНД имеет модульную структуру и состоит из решающих модулей, программ трансляции описания моделей, программ анализа и вывода результатов, а также программ пользовательского интерфейса.

Из алгоритмических особенностей программной реализации комплекса можно выделить автоматическую генерацию ФОРТРАН-программы вычисления правых частей уравнений движения и коэффициентов уравнений связей. Такой прием позволяет оптимизировать по быстродействию

соответствующие программные модули.

Программа интерфейса пользователя fshell предоставляет разработчику набор сервисных возможностей для описания геометрии модели, задания параметров, назначения управляющей информации для интегрирования, задания вида обработки и вывода. Данный интерфейс пользователя связан с остальными модулями системы только через текстовые файлы. Степень привязанности групп модулей к определенным вычислительным платформам разная.

Решающие модули – генерации уравнений движения и их интегрирования выполнены на языке ФОРТРАН и являются фактически машинно-независимыми. Для переноса их на другую аппаратную основу следует только сменить компилятор. Программы трансляции описания моделей и анализа результатов написаны на языках ФОРТРАН и С, используют стандартные библиотеки и также допускают простой перенос на другой компьютер. Модули вывода результатов анализа – визуализатор графиков и аниматор выполнены на языке С и предназначены для работы в среде MS DOS и MS WINDOWS. Программа пользовательского интерфейса написана на языке С++ с использованием инструментальной среды С++ Builder 4.

По количеству операторов текста программы для типичных моделей с кинематическими парами наибольший объем операций связан с вычислением коэффициентов уравнений связей и их правых частей. По количеству операций наибольший объем вычислений приходится на триангуляцию матрицы связей, при этом число операций растет с увеличением размера матрицы сильнее, чем степень единицы и существенно зависит от структуры матрицы – ширины ее ленты. Для представления матриц и решения линейной системы алгебраических уравнений используются методы разреженных матриц.

Распараллеливание вычислений просто осуществляется для вычислений коэффициентов матрицы связей. Коэффициенты для каждой кинематической пары рассчитываются в отдельных подпрограммах, которые могут работать независимо друг от друга. Триангуляция матрицы связей на-

прямую не представляется в виде независимо работающих фрагментов, и распараллеливание в этом случае требует отдельного рассмотрения. Размерность матрицы связей и, следовательно, время расчета можно уменьшить, переводя жесткие кинематические пары в податливые. В принципе возможно представление всех кинематических пар податливыми с большой жесткостью и тогда вычисление правых частей полностью распараллеливается. Для задания свойств упругих тел – собственных частот и форм служит интерфейс с существующими программами расчета по МКЭ.

После окончания интегрирования пользователь может многократно задавать параметры вывода и выполнять обработку и вывод результатов решения с помощью отдельной универсальной программы, не повторяя интегрирования уравнений заново.

Расчетная схема исследуемой механической системы представляется в интерфейсе пользователя набором графических элементов, изображающих тела, соединительные элементы и нагрузки, а также специальные блоки макроопределений – макросы (рис. 1). Здесь к макросам отнесены модели колебаний систем человек–сидение, качения эластичного колеса, амортизаторов с ог-

раничителями, буферов рессор. Тела модели изображаются проволоочной геометрией. Программа снабжена необходимыми командами редактирования геометрии.

Тела модели связываются с помощью кинематических пар или упругодемпфирующих элементов, изображенных соответствующими маркерами (см. рис. 1), вид которых зависит от типа связи и включает в себя информацию об ее ориентации. Для кинематических пар ориентация связи определяет систему координат, в которой строятся уравнения связи.

Для моделирования механических систем с контурами управления в систему моделирования введены некоторые типовые элементы блок-схем систем управления. Для реализации блок-схем с безинерционными преобразованиями сигналов введены три класса элементов – безинерционные элементы контуров управления, индикаторы выходов и индикаторы входов. Безинерционные элементы разделяются на двухполюсники и многополюсники. Двухполюсники осуществляют типовые преобразования сигналов – сложение, умножение и т.д. Многополюсники служат для моделирования специальных взаимодействий

Макросы обладают характеристиками двух типов – собственно параметрами, определяющими

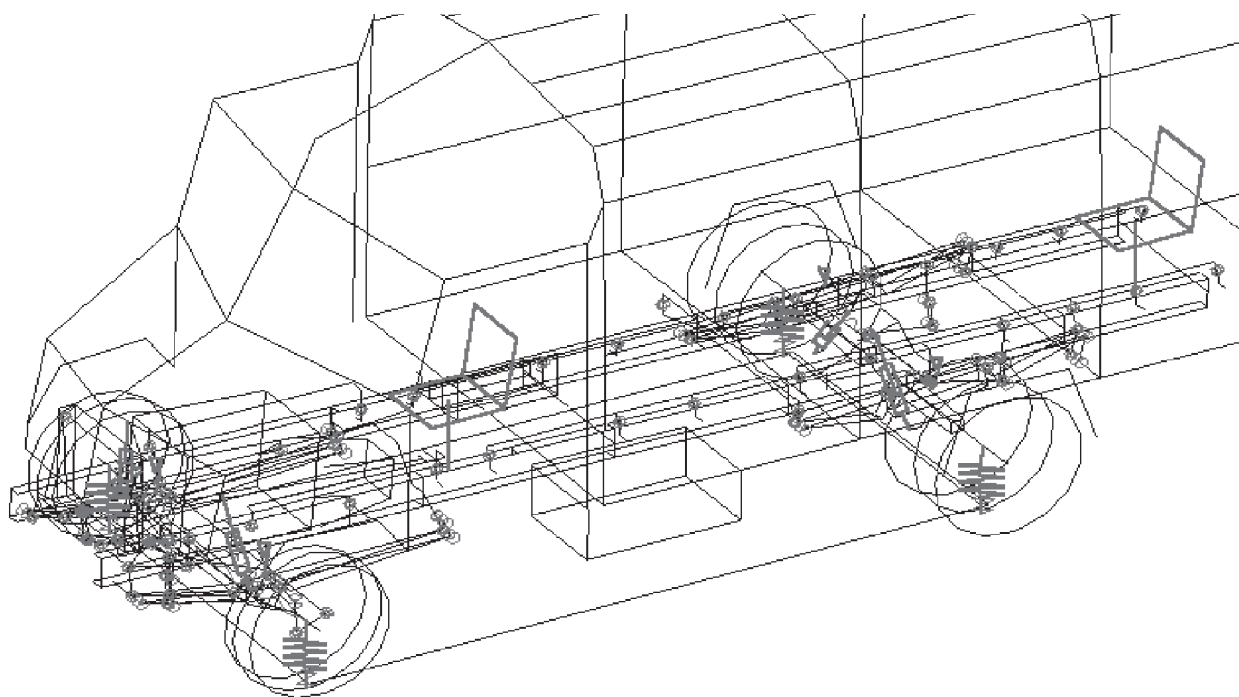


Рис. 1. Представление элементов расчетной схемы. ЗИЛ 32501, упругие рама и фургон

ми численные значения параметров взаимодействия, и входными параметрами, задающими структурную информацию, например номера тел и узлов, к которым относится то или иное взаимодействие. Входные параметры, имеющие графическое представление на геометрии расчетной схемы, задаются прямым указанием такого графического элемента, например тела или узла на теле.

Результаты интегрирования уравнений движения записываются на диск и в дальнейшем могут использоваться для многократного анализа. Для задания вида обработки и вывода результатов введено понятие замера, которое включает в себя указатели вида параметра, подлежащего обработке, а также способ анализа и представления. Замеры отображаются в виде специальных маркеров, привязанных к точкам тел или соединительным элементам, динамические характеристики которых нужно вывести. Замеры объединяются в именованные группы, позволяющие образовывать и хранить различные наборы директив обработки.

Всего в алгоритмы анализа включено 25 различных видов обработки – спектральная плотность, гистограммы плотности распределения вероятности, функции когерентности, передаточные функции и т.д. Результаты анализа могут быть представлены в виде графиков, таблиц, а также анимационного изображения. Предусмотрен сброс реализаций в форматном виде для последующей передачи в другие системы анализа.

Опыт использования комплекса ФРУНД в задачах динамики машин

С помощью программного комплекса ФРУНД были решены задачи динамики экипажа скоростного локомотива [9], легковых и грузовых автомобилей [10–12] и ряда других объектов.

Работа с моделями в диапазоне размерностей 10–400 показала близкую к линейной зависимость вычислительных затрат от размерности. С ростом размерности затраты на триангуляцию матрицы системы растут быстрее затрат на вычисление коэффициентов самой матрицы. Существенное значение при этом приобретает структура матрицы связей, оптимизация которой позволяет в несколько раз снизить время на триангуляцию.

В целом использование программного комплекса ФРУНД для решения широкого круга задач динамики транспортных средств показало, что заложенные в его основу методы по временным характеристикам не уступают существующим комплексам, использующим жесткие дифференциальные уравнения движения.

Опыт решения задач динамики на пространственных моделях высокой размерности (несколько сот степеней свободы) показал недостаточность традиционных способов представления результатов решения, таких как графики временных реализаций, различных частотных и статистических характеристик, анимации движе-

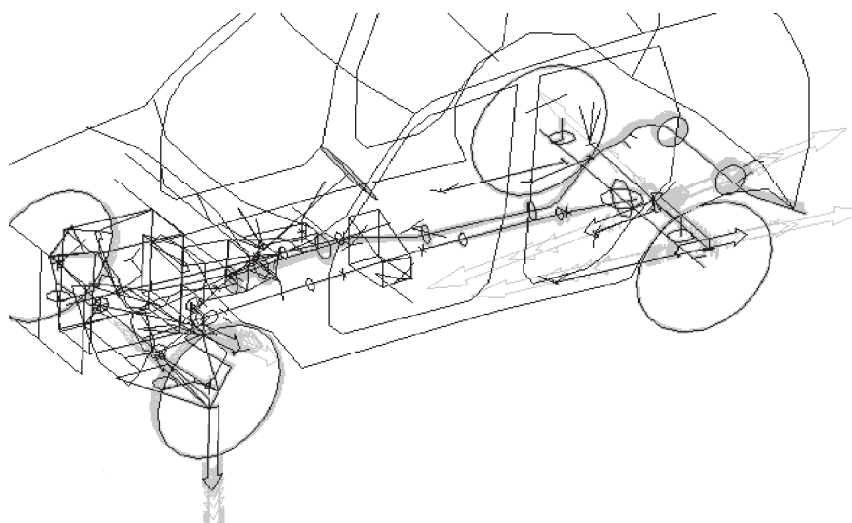


Рис. 2. Кинограмма изменения реакций в элементах подвески автомобиля ВАЗ 2123 при импульсном возмущении

ния системы. Для эффективного использования всей получаемой в расчете информации о динамическом поведении конструкции необходима разработка специальных видов представления параметров движения системы. К попыткам решения такой задачи можно отнести возможность вывода на анимационном изображении маркеров величин реакций в связях (рис. 2). При подготовке анимации движения исследуемой системы по специальному алгоритму могут увеличиваться масштабы смещений тел для получения представления о форме колебаний (рис. 3). Здесь показан след от колебательных смещений рамы энергоблока, соответствующий колебаниям на частоте основной гармоники. Сложность состоит в дифференцированном увеличении масштабов смещений тел, совершающих большие и малые движения. Для моделей с упругими телами может выполняться анимация с увеличенными упругими смещениями тел (рис. 4). В целом эта сторона обработки и представления результатов требует дальнейшего развития.

Геометрия и результаты расчетов в системе моделирования ФРУНД могут передаваться в специализированные графические системы для получения высокореалистичных анимационных изображений. В частности, реализован вывод расчетной схемы в формате MAXScript комплекса 3DS Max 5. На рис. 5 показана расчетная схе-

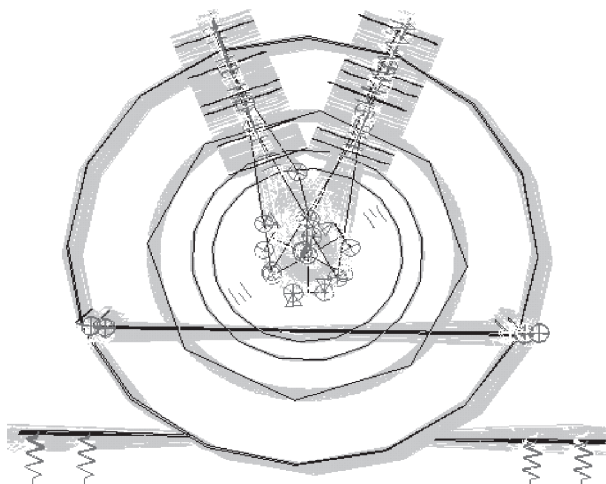


Рис. 3. Кинограмма угловых колебаний рамы дизель-генератора с увеличенными смещениями

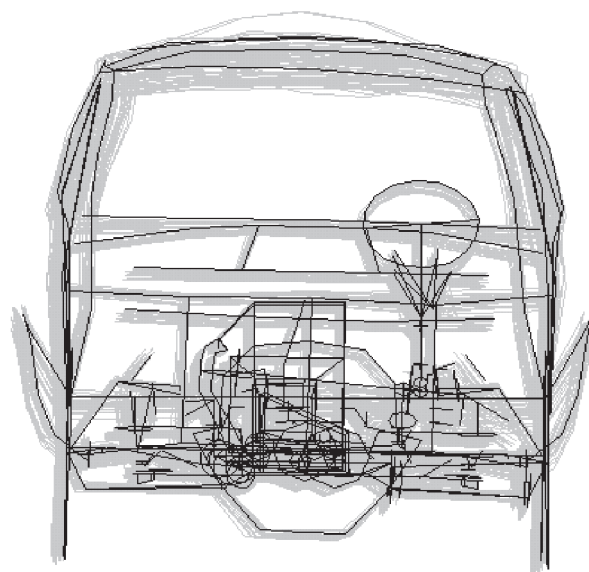


Рис. 4. Кинограмма упругих перемещений кузова автомобиля ВАЗ 2123 при движении по “ровному булыжнику”

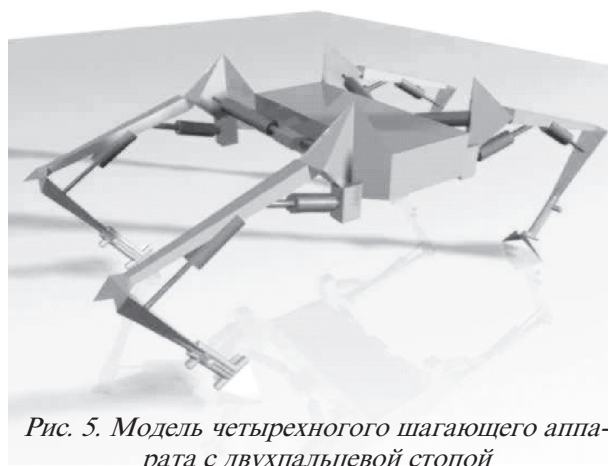


Рис. 5. Модель четырехногого шагающего аппарата с двухпальцевой стопой

ма шагающего аппарата, полученная с помощью этой программы.

Представляет интерес обобщение опыта эксплуатации комплекса для расчета динамических показателей машин, который показывает, что значимость применения систем моделирования динамики определяется не только их вычислительной эффективностью и универсальностью, а также удобством пользовательского интерфейса, но и рядом причин организационного и технического характера. К организационным можно отнести то, что разработка традиционных типов машин имеет устоявшуюся технологию, включающую в себя средства доводки динамических показателей объектов, например, экспериментальные. Расчетные методы, хотя и дают

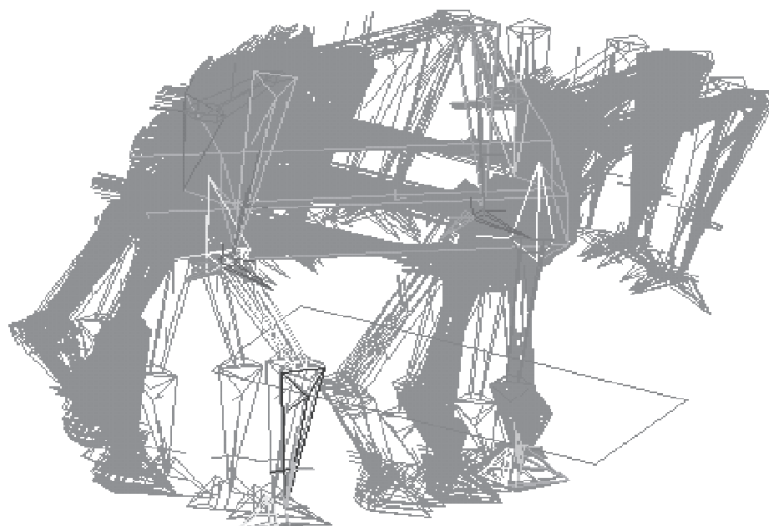


Рис. 6. Кинограмма поворота четырехногого шагающего аппарата.
Управляемое движение

важную информацию, но она носит вспомогательный характер и плохо согласуется со сложившейся технологией проектирования. К техническим причинам, по нашему мнению, следует отнести то обстоятельство, что математические модели не включены в принципиальные функциональные схемы существующих машин. Все это обуславливает необходимость поиска новых областей применения математических моделей.

Среди таких областей можно указать на системы технической диагностики – телематики [13], виртуальных испытаний [14] и создание новых классов управляемых машин. В системе моделирования ФРУНД реализован метод синтеза управляемого движения произвольной механической системы методом обратной задачи [15], суть которого состоит в параллельном решении трех взаимосвязанных моделей объекта – модели программного движения, модели для нахождения сил в приводах и модели управляемого движения. В качестве примера на рис. 5 показана модель четырехногого шагающего аппарата с двухпальцевой стопой. Метод позволяет просто синтезировать управление таким аппаратом для различных видов движений – вперед, вбок, разворота на месте и в движении (рис. 6). Для такого рода управляемых машин методы моделирования являются не только инструментом разработки, но и могут служить вычислительной основой системы управления.

Заключение

Представленная система моделирования ФРУНД, основанная на мягких дифференциальных уравнениях движения систем тел, обладает высокой эффективностью при решении типовых задач динамики систем тел и позволяет проводить структурный анализ кинематических схем машин, а также формулировать и решать задачи синтеза управляемого движения машин.

Список литературы

1. 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.
2. Курдюк С.А., Шмелев Е.Н. Особенности формирования математических моделей технических объектов средствами программного комплекса PRADIS // Информационные технологии. 1996. № 3. С. 14–19.
3. Байков В.Г. Моделирование динамики механических систем в программном комплексе Euler // САПР и графика. 1998. № 1. С. 38–48.
4. Mechanical Dynamics Inc. ADAMS/Vehicle. User's Guide (Version 8.0). November 1988.
5. Computer Aided Design Software Inc. DADS. User's Guide. 1992.
6. Горобцов А.С. Солоденков С.В. Алгоритмы

- численного интегрирования уравнений движения систем тел с множителями Лагранжа // *Машиностроение и инженерное образование*. 2005. № 3. С. 20–27.
7. Горобцов А.С. Численное интегрирование уравнений движения систем тел произвольной структуры / Матер. междунар. конф. «Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении». – Саратов, 2002. С. 16–20.
 8. Величенко В.В. Системный удар в колебаниях сложных механических систем / Тр. Пятой межд. конф. по пробл. колебаний «ICOVP – 2001». – М. 2001. С. 142–145.
 9. Горобцов А.С., Карцов С.К., Михальченко Г.С., Погорелов Д.Ю. Компьютерное моделирование ходовой динамики восьмиосного экипажа скоростного электровоза // *Динамика, прочность и надежность транспортных машин*. – Брянск, 1999. С. 4–10.
 10. Горобцов А.С., Дамьяно Э.С., Захаров В.Г., Карцов С.К., Курасов Ю.В., Лысанов А.В., Плетнев А.Е. Исследование вибронагруженности конструкции автомобиля ЗИЛ 5301 СС на математической модели // *Сб. науч. тр. «Техника, технология и перспективные материалы»*. Т.2. 1999. С. 132–140.
 11. Горобцов А.С., Карцов С.К., Кушвид Р.П., Москвин А.М. Влияние упругих форм колебаний кузова на вибронагруженность конструкции автомобиля // *Избр. докл. II–IV межд. науч.-практич. конф. (1996–1998 гг.) «Проблемы развития автомобилестроения в России»*. – Тольятти, 1999. С. 13–16.
 12. Горобцов А.С., Карцов С.К., Поляков Ю.А. Моделирование характеристик буферов подвесок автобусов // *Объединенный научный журнал*. 2002. № 22. С. 51–52.
 13. Lansinger E. Software support for telematics // *Automotive engineering international*. 2002. Oct. P. 32–34.
 14. Pfister F., Reitze C., Shmidt A. Hardware in the Loop – the Technologie for Development and Test of Vehicle Control Systems // *MDI ADAMS Conference*. – Berlin, 1999.
 15. Gorobtsov A. Theoretical Investigations of the Control Movement of the CLAWAR at Statically Unstable Regimes // *Bionspiration and Robotics: Walking and Climbing Robots* ed. by Maki K. Habib. – Vienna, 2007. P. 95–106.