

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Шимановского Владимира Александровича на тему «Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных алгоритмов компьютерного моделирования систем связанных твёрдых тел», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

В диссертационной работе Шимановского В.А. рассматриваются сложные механические системы, моделируемые конечным множеством связанных абсолютно твёрдых тел со структурой открытого дерева, т.е. образующих различные кинематические пары, в которых кинематические связи являются удерживающими, голономными и идеальными (далее СТТ). Разработка математических моделей СТТ, включающих Уравнения Движения (УД), и эффективных численных методов их исследования на ПЭВМ является актуальной задачей, например, в ГОСТ Р 60.0.7.3 - 2020 РОБОТЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА «Метод математического моделирования показателей надёжности и виртуализации испытаний на надёжность базовых элементов робототехнических комплексов при проектировании» рекомендован формализм Лагранжа вывода УД промышленных роботов (смотрите раздел 4.4.5.3 этого ГОСТа), который совершенно непригоден для этих целей, на что указывают многие известные учёные в области моделирования роботов.

Существует большое разнообразие методов моделирования СТТ, включающих автоматизированное формирование их УД. Поэтому диссертант, в обзорном разделе рассматривает в основном компьютерно-ориентированные методы, которые нацелены на численное моделирование СТТ с десятками и сотнями степеней подвижности. С различной степенью подробности на 20-ти страницах изложены результаты рассмотрения более двухсот литературных источников по теме диссертации, что позволило обоснованно сформулировать актуальные цели и соответствующие задачи научного исследования.

В первой главе для рассматриваемых СТТ получены матричные кинематические и динамические соотношения, из которых основные формулы представлены в рекуррентном виде, что способствует их эффективной программной реализации. Выписанная система дифференциально-алгебраических уравнений может быть использована непосредственно для моделирования динамики СТТ. В то же время она послужила основой для получения известных и новых форм записи УД СТТ.

Преобразования к известным формам УД связаны с уменьшением размерности (редукцией) расширенной системы УД. Так получают известные уравнения, например, уравнения Лагранжа первого и второго рода. Новая форма матричных УД СТТ в гамильтоновых переменных имеет расширенный состав параметров состояния (обобщённые координаты и импульсы, декартовы координаты и импульсы) и её рекуррентная структура ориентирована на эффективное численное моделирование. Следует отметить, что полученные явные матричные формы уравнений Лагранжа не требуют трудоёмких операций составления кинетической энергии СТТ и её дифференцирования.

Для описания кинематики СТТ введена матрица кинематической структуры (МКС) и исследованы её свойства. Выведены рекуррентные формулы для нахождения обратной к ней матрицы. Получены формулы для производных МКС и обратной к ней матрицы, не требующие дифференцирования элементов этих матриц. Использование МКС позволило, во-первых, записать УД СТТ в компактной матричной форме, во-вторых, предложить новый подход к классификации УД СТТ, который включает в себя шесть форм записи УД СТТ в лагранжевых и гамильтоновых переменных.

Таким образом, в первой главе разработаны новые математические модели, относящиеся к теоретической механике систем тел. В остальных главах разработаны эффективные алгоритмы и соответствующее ПО для численного исследования СТТ на ПЭВМ.

Разработан итерационный алгоритм решения УД СТТ с положительно определённой матрицей инерционных коэффициентов, предназначенный для использования совместно со стандартными методами интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Основное отличие предложенного алгоритма от классических методов сопряжённых градиентов заключается в том, что помимо нахождения решения системы линейных уравнений вычисляется обратная матрица к матрице системы, которая является аналогом предобусловливателя в методах сопряжённых направлений. Приведённые в работе многочисленные вычислительные эксперименты показали, что среднее число итераций в данном алгоритме существенно меньше числа степеней свободы СТТ.

Разработан алгоритм приведения системы дифференциально-алгебраических уравнений движения СТТ относительно расширенного состава переменных состояния к системе ОДУ в нормальной форме Коши. Этот алгоритм имеет линейный закон роста числа арифметических операций (вычислительной трудоёмкости) в зависимости от количества тел.

Получены формулы зависимостей числа арифметических операций с плавающей точкой от количества тел СТТ, её кинематической структуры и числа степеней свободы в шарнирах для всех этапов моделирования динамики СТТ. На их основе проведены анализ и сравнение вычислительной трудоёмкости различных подходов к моделированию СТТ. Указаны условия, при которых тот или иной метод, рассмотренный в диссертации, оказывается наиболее эффективным. Даны рекомендации по выбору эффективного метода формирования УД и их разрешения в зависимости от структуры СТТ, числа тел и типов шарниров.

Достоверность полученных результатов подтверждена многочисленными вычислительными экспериментами.

Рассмотренные в диссертационной работе модели и алгоритмы положены в основу программного комплекса моделирования СТТ с переменной кинематической структурой D90, на который имеются свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, а также акт внедрения в практику расчётно-конструкторских работ ЗАО «СКБ» ПАО «Мотовилихинские заводы».

Научные и практические результаты диссертации используются в учебном процессе, что подтверждено актом их внедрения в учебный процесс.

Поставленные в диссертации цели достигнуты, и все задачи решены. Достигнутые научные результаты достаточно обоснованы, а научные изыскания имеют большой потенциал развития. По мнению диссертанта направление дальнейших исследований может быть связано с распространением основных подходов, разработанных в диссертации, к моделированию СТТ с замкнутыми кинематическими цепями и неголономными связями. Это позволит охватить такие СТТ как шагающие машины, колесные и гусеничные транспортные средства, а также РТК, в которых взаимодействуют несколько манипуляторов в процессах сборки изделий приборостроения и машиностроения. По моему мнению, актуально продолжить развивать рассмотренные в диссертационной работе В.А. Шимановского новые методы в направлении автоматического выписывания УД СТТ в скалярном (явном, символьном) виде и явно выраженными постоянными параметрами с доказательством их оптимальности в смысле минимума арифметических операций, что позволит эффективно решать задачи идентификации неизвестных параметров СТТ или синтезировать параметры СТТ, обеспечивающие ей заданные свойства.

К содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания.

1. По методам и результатам исследований диссертация В.А. Шимановского близка к работам В.В. Величенко. Желательно

- указать их основные отличия.
2. Единый подход в исследованиях, например, в разработке процедуры классификации различных способов построения математических моделей СТТ по тексту диссертации трудно проследить. Желательно уточнить суть единого подхода.
 3. Считаю, что в формулировке «... методика выбора оптимального метода формирования уравнений движения ...» (стр. 9) словосочетание «оптимального метода» необходимо заменить на словосочетание «наилучшего из известных методов».
 4. При интегрировании УД в различных формах они приводятся к нормальной форме ОДУ, т.е. решаются СЛАУ различной размерности, которые поэтому имеют различную степень обусловленности. Это влияет на шаг интегрирования и, значит, на общее время интегрирования. Поэтому алгоритмы нужно сравнивать по времени выполнения не на одном шаге, а на одинаковых промежутках моделирования.
 5. В работе приведены теоретические оценки сходимости итерационного алгоритма приведения ОДУ к нормальной форме Коши в зависимости от шага интегрирования. Однако отсутствуют оценки зависимости числа итераций от величины шага интегрирования и размерности СТТ.
 6. В тексте диссертации отсутствуют примеры применения основных этапов моделирования СТТ с использованием предлагаемых в диссертации методов.

По поводу последнего замечания отмечу, что по моей просьбе диссертант предоставил мне такие примеры, что окончательно убедило меня в достоверности полученных в диссертации новых научных результатов.

Отмеченные замечания не влияют на качество исследований и на их теоретические и практические результаты.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертационного исследования полно и подробно представлены в центральной печати.

Диссертационная работа Шимановского Владимира Александровича «Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных алгоритмов компьютерного моделирования систем связанных твёрдых тел» по содержанию и полноте изложенного материала соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Считаю, что диссертационная работа Шимановского Владимира Александровича «Разработка, обоснование и тестирование эффективных

численных алгоритмов компьютерного моделирования систем связанных твёрдых тел» представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой решены современные научные задачи. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор Шимановский Владимир Александрович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук (01.02.01 – Теоретическая механика), профессор, профессор кафедры «Автоматика», Филиал ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» в г. Миассе, 456318, Челябинская область, г. Миасс, проспект Октября, д. 16, тел. +7 (3513) 532885, e-mail: teleginai@yuzhu.ru

[Handwritten signature]
/А.И.Телегин/

Я Телегин Александр Иванович, даю своё согласие на включение своих персональных данных, в документы, связанные с защитой диссертации Шимановского Владимира Александровича, и их дальнейшую обработку.

[Handwritten signature]
/А.И.Телегин/

Подпись Телегина А.И.
Старший инспектор ОК

29.05.20



Свиридова И.В.

[Small handwritten mark]