

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«САРАТОВСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ СЦ РАН)**

ул. Рабочая, 24, г. Саратов, 410028

Тел./факс (845-2) 23-45-10, 27-14-36. E-mail: [snransar@san.ru](mailto:snransar@san.ru), [www.снцран.рф](http://www.снцран.рф)

07 июля 2024 № 17800-133

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ФИЦ СЦ РАН,  
д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_

Хлебцов Б.Н.  
\_\_\_\_\_ 2024 г.



### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Шимановского Владимира Александровича  
«Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных алгоритмов компьютерного моделирования динамики 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

#### **Актуальность темы выполненного исследования**

Значительный прогресс в развитии вычислительных технологий, произошедший за последние несколько десятилетий, открыл перед учёными и инженерами целый ряд принципиально новых перспектив, связанных с возможностью частичной или полной замены дорогостоящих натуральных испытаний новых образцов техники компьютерным экспериментом. Одно из интенсивно развивающихся направлений связано с разработкой программных средств компьютерного моделирования динамики механических систем, расчётная схема которых представляет собой систему связанных твёрдых тел (СТТ). Моделирование динамики СТТ необходимо для разработки конструкций новых машин, транспортных и робототехнических комплексов и систем

управления для них. Как правило, на стадии проектирования технических устройств приходится проводить многократные вычислительные эксперименты для расчёта динамического поведения различных вариантов конструкции в различных условиях эксплуатации. Поэтому разработка новых математических моделей СТТ и эффективных численных методов их исследования, снижающих время выполнения расчётов, является актуальной задачей.

### **Научная новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Для разрешения уравнений движения (УД) с положительно определённой матрицей системы (например, уравнений Лагранжа второго рода или уравнений Гамильтона) относительно старших производных в работе разработан итерационный алгоритм, предназначенный для использования совместно со стандартными методами интегрирования ОДУ. Данный алгоритм, в отличие от классических прямых методов решения СЛАУ, таких как Гаусса или Холецкого, обеспечивает квадратичную вычислительную сложность и в связи с этим многократно уменьшает вычислительные затраты при моделировании СТТ с малым числом ветвлений в графе системы.

В работе выведена новая форма УД СТТ в гамильтоновых переменных, которая отличается расширенным составом переменных состояния и рекуррентной структурой. Разработан алгоритм приведения расширенных форм УД СТТ со структурой дерева к системам обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме, отличающийся применением симметричного  $L^TDL$ -разложения. В отличие от классических уравнений Лагранжа и Гамильтона вычислительная трудоёмкость компьютерного моделирования с использованием данного алгоритма растёт по линейному закону в зависимости от числа тел в механической системе.

Проведён анализ и сравнение вычислительной трудоёмкости различных подходов к моделированию СТТ. Указаны условия, при которых тот или иной метод оказывается эффективнее остальных. В работе предложен алгоритм и даны рекомендации по выбору наилучшего метода формирования УД и разрешения их в зависимости от структуры системы, числа тел и типов шарниров.

Разработан комплекс программ, предназначенный для моделирования динамики, оптимизации управления и идентификации параметров одного класса технических систем с отделяющимися элементами.



## **Практическая и теоретическая значимость полученных автором диссертации результатов**

Теоретическая значимость работы заключается в разработке комплекса алгоритмов, повышающих эффективность компьютерного моделирования, в обоснованных рекомендациях по выбору наиболее эффективного подхода к формированию математических моделей сложных механических систем в зависимости от их кинематической структуры.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанных методов, алгоритмов и программного комплекса для решения задач моделирования при проектировании новых технических систем, расчётная схема которых может быть представлена в виде связки абсолютно твёрдых тел.

## **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений**

Сформулированные в диссертационной работе положения, выводы и рекомендации подтверждаются анализом научной литературы по тематике исследования. Достоверность результатов обеспечена корректной постановкой задач, применением современного математического аппарата. Все представленные в работе алгоритмы строго обоснованы доказательством теорем о сходимости. Теоретические результаты подтверждены сравнительными вычислительными экспериментами и для тестовых примеров совпадают с результатами других авторов.

## **Оценка содержания диссертации и автореферата**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 177 страницах, содержит 26 рисунков и 16 таблиц. Список литературы включает 207 наименований.

Введение отражает актуальность и степень разработанности темы исследования, цель и задачи, научную новизну, практическую и теоретическую значимость, степень достоверности, выносимые на защиту положения, апробацию результатов и личный вклад автора.

В первой главе автором проведён анализ литературных источников, содержащих сведения об объекте исследования, который отражает современное состояние вопроса моделирования СТТ. Рассмотрены методы формирования УД СТТ со структурой дерева с голономными идеальными удерживающими связями, ориентированные на численное моделирование. Выведена новая форма уравнений движения в гамильтоновых переменных, отличающаяся расширенным составом переменных состояния: обобщённых координат и импульсов, декартовых скоростей и импульсов.



Во второй главе рассмотрены вопросы разрешения относительно старших производных УД СТТ в форме уравнений Лагранжа первого и второго рода, а также уравнений Гамильтона и уравнений Гамильтона с множителями Лагранжа. Для разрешения УД с разреженными матрицами системы в работе предлагается применять блочный вариант  $L^T L$ -разложения Холецкого, учитывающий структуру разреженности этих матриц. Для УД с плотно заполненными матрицами разработан новый итерационный квазиньютоновский метод, основанный на формуле Пауэлла-Бройдена ранга один.

В третьей главе рассматриваются методы разрешения расширенных систем УД СТТ в переменных Лагранжа и Гамильтона, записанных в форме дифференциально-алгебраических уравнений. В работе предложен новый алгоритм, основанный на процедуре блочного симметричного  $L^T DL$ -разложения с использованием метода квадратных корней Холецкого. Этот метод характеризуется линейным законом роста числа арифметических операций в зависимости от количества тел в механической системе и независимостью от топологической структуры механической системы.

Четвёртая глава посвящена вопросам, связанным с оценкой и сравнительным анализом эффективности рассмотренных в диссертации алгоритмов формирования УД СТТ и приведения их к нормальной форме. Для каждого метода, рассмотренного в диссертации, построена теоретическая оценка зависимости числа операций с плавающей точкой от количества тел в системе, её кинематической структуры и числа степеней свободы в шарнирах, требуемых на каждом шаге численного интегрирования для вычисления обобщённых ускорений. На их основе выполнен анализ вычислительной сложности этих методов для различных классов механических систем. Указаны условия, при которых тот или иной метод, рассмотренный в диссертации, оказывается наиболее эффективным. Теоретические оценки эффективности алгоритмов были подтверждены многочисленными вычислительными экспериментами на примерах моделирования динамики механических систем, отличающихся числом тел, кинематической структурой и количеством степеней свободы в шарнирах.

В пятой главе описан комплекс программ для моделирования динамики изделий машиностроения, математические модели которых могут быть представлены системами твёрдых тел. В основу комплекса программ легли разработанные в диссертации математические методы и численные алгоритмы. На комплекс программ получено пять свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В заключении приведены основные результаты работы.

В приложении приведён акт внедрения результатов диссертации в практику работы ЗАО «СКБ» ПАО «Мотовилихинские заводы», г. Пермь.



Содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленным задачам исследования. Автореферат диссертации правильно и полно отражает её содержание.

Основные научные результаты приведены в 38 научных работах, включая 5 статей в журналах из перечня изданий, рецензируемых ВАК, 1 публикации в издании, входящей в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science. Получены 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Соответствие диссертационной работы паспорту специальности**

Диссертационная работа Шимановского Владимира Александровича «Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных алгоритмов компьютерного моделирования динамики систем связанных твёрдых тел» соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: пункту № 1 – «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений (физико-математические науки)»; пункту № 2 – «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий» и пункту № 3 – «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента».

### **Замечания по содержанию и оформлению работы**

1. В работе соискателя кинематические соотношения и УД СТТ записаны в проекциях на оси связанных с телами систем координат. В работах других авторов УД СТТ часто записываются в абсолютной системе координат. Требуется обосновать выбор локальных систем координат с точки зрения вычислительной эффективности.

2. В работе исследовано влияние кинематической структуры СТТ на вычислительную трудоёмкость моделирования СТТ. На продолжительность вычислительного процесса моделирования также влияет нелинейность действующих сил (например, сил вязкого или кулоновского трения). Этот вопрос не исследован в работе.

3. В работе подробно рассмотрены две задачи: построение УД СТТ в различных формах и приведение их к нормальной форме Коши. Даны рекомендации по выбору эффективного метода решения этих задач в зависимости от характера механической системы. Однако не рассмотрена задача выбора наиболее подходящего интегратора в зависимости от устойчивости, жесткости или сложности математической модели исследуемого объекта.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней**

Диссертационная работа Шимановского Владимира Александровича «Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных алгоритмов компьютерного моделирования динамики систем связанных твёрдых тел», соответствует требованиям пунктов 9-10 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв подготовлен кандидатом технических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории анализа и синтеза динамических систем в прецизионной механике ИПТМУ РАН Голиковым Алексеем Викторовичем.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании лаборатории Анализа и синтеза динамических систем в прецизионной механике Института проблем точной механики (ИПТМУ РАН) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук» протокол № 7 от «27» мая 2024 года.

Руководитель ИПТМУ РАН  
к.т.н.

Костерев Андрей Александрович

Ведущий научный сотрудник  
лаборатории Анализа и синтеза  
динамических систем  
в прецизионной механике ИПТМУ РАН  
к.т.н.

Голиков Алексей Викторович

Подписи Костерева А.А., Голикова А.В. заверяю

Б.Н. Хлебцов





### **Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук»

Адрес: 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, 24

Тел. (845-2)27-14-36; (845-2)23-45-10

Email: [sncransar@san.ru](mailto:sncransar@san.ru); [sncransar@yandex.ru](mailto:sncransar@yandex.ru)

Сайт: <http://СНЦРАН.рф>