

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям  
Пермского государственного национального  
исследовательского университета,  
кандидат физ.- мат. наук

В.А.Ирха

«11» марта 2024 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»  
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных алгоритмов компьютерного моделирования динамики систем связанных твёрдых тел» выполнена на кафедре высшей математики.

В период подготовки диссертации соискатель учёной степени кандидата физико-математических наук Шимановский Владимир Александрович работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», на кафедре высшей математики в должности старшего преподавателя.

В 1995 году Шимановский Владимир Александрович окончил с отличием Пермский государственный университет по специальности «Механика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего

образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» в 2024 г.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент Иванов Владимир Николаевич, работает доцентом кафедры высшей математики ФГАОУ ВО ПГНИУ.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**1. Личное участие соискателя учёной степени в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:**

Все представленные в диссертации результаты получены автором лично или с его непосредственным участием. Постановка задачи выполнена научным руководителем при участии соискателя. Вывод новой формы уравнений движения системы твёрдых тел (УД СТТ) выполнен лично автором при участии научного руководителя. Разработка и теоретическое обоснование алгоритмов формирования УД СТТ, приведения их к нормальной форме обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), реализация алгоритмов в виде программ для ЭВМ, проведение численных экспериментов и анализ результатов вычислений осуществлялись лично автором. Разработка математических моделей одного класса изделий машиностроения с переменной кинематической структурой выполнена автором совместно с группой соавторов. Лично автором выполнены описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация инструмента моделирования поведения системы в виде комплекса программ для ЭВМ.

**2. Научная новизна диссертационного исследования**

Выведена новая форма УД СТТ в гамильтоновых переменных, которая отличается от известных расширенным составом переменных состояния, рекуррентной структурой и ориентированная на численное моделирование. Обосновано место этих уравнений среди существующих УД СТТ.

Разработан новый итерационный алгоритм разрешения УД СТТ с положительно определённой матрицей системы относительно старших

производных, в котором в качестве предобусловливателя используется приближение к обратной для обобщённой матрицы инерции.

Разработан новый алгоритм приведения расширенных форм УД СТТ к системам обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме. Этот метод отличается от известных применением симметричного LTDL-разложения.

Проведены анализ и сравнение вычислительной трудоёмкости различных подходов к моделированию СТТ. Указаны условия, при которых тот или иной метод оказывается наиболее эффективным.

В работе впервые предложена методика выбора оптимального метода формирования уравнений движения и приведения их к нормальной форме в зависимости от структуры СТТ, числа тел и типов шарниров.

### **3. Степень достоверности результатов проведённых исследований**

Основные научные результаты диссертации получены на основе фундаментальных положений теоретической механики, линейной алгебры и теории численных методов. Все представленные в работе численные алгоритмы строго обоснованы доказательством теорем о сходимости. Теоретические результаты подтверждены сравнительными вычислительными экспериментами и для тестовых примеров совпадают с результатами расчётов других авторов, а также сравнением результатов работы комплекса программ с результатами стендовых и предварительных испытаний опытных изделий АО «СКБ» (до 2024 года — ЗАО «СКБ» ПАО «Мотовилихинские заводы»), г. Пермь.

### **4. Практическая и теоретическая значимость диссертационного исследования**

Разработанный соискателем комплекс алгоритмов повышает эффективность компьютерного моделирования СТТ. Созданная на основе этих алгоритмов библиотека подпрограмм позволяет формировать УД СТТ в различных формах и генерировать программы их численного моделирования. Результаты, полученные в процессе исследования, позволили сформировать

рекомендации по выбору оптимального подхода к компьютерному моделированию новых технических систем.

Предложенные математические модели, алгоритмы и вычислительные программы реализованы в комплексе программ, используемом при проектировании новых изделий АО «СКБ». Результаты, изложенные в диссертации, могут быть применены при разработке программного обеспечения компьютерного моделирования сложных механических систем.

## **5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

По теме диссертационной работы Шимановского Владимира Александровича опубликовано 38 научных работ, в том числе 5 в ведущих рецензируемых изданиях, 1 – в издании, индексированном в международных базах цитирования Web of Science и Scopus. Основные положения и результаты работы отражены в следующих научных публикациях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий или в базы цитирования Web of Science, Scopus:

1. Классификация моделей систем твёрдых тел, используемых в численных расчётах динамического поведения машиностроительных конструкций / Иванов В. Н., Домбровский И. В., Шимановский В. А., Набоков Ф. В. и Шевелёв Н. А. // Вестник Удмуртского университета. Серия Математика. Механика. Компьютерные науки. — 2012. — № 2. — С. 139–155. (вклад автора 6 с./17 с.) **(ВАК)**

В работе представлена классификация форм уравнений динамики систем связанных твёрдых тел со структурой дерева, предназначенных для расчёта динамики сложных машиностроительных конструкций. В основу классификации положены компактные матричные формы записи уравнений кинематики и динамики систем тел, полученные с использованием понятия матрицы кинематической структуры и геометрического подхода при описании относительного движения. Автору принадлежит описание уравнений кинематики и динамики систем твёрдых тел в различных компактных матричных формах записи, разработка алгоритмов, создание программ для ЭВМ и проведение серии численных экспериментов.

2. Иванов В. Н., Полосков И. Е., Шимановский В. А. Математические модели систем связанных твёрдых тел в импульсах Пуассона // *Фундаментальные исследования*. — 2016. — № 10-3. — С. 493–499. (вклад автора 4 с./7 с.) **(ВАК)**

В статье представлена новая матричная форма уравнений движения систем абсолютно твёрдых тел со структурой дерева в гамильтоновых переменных. В качестве независимых параметров, однозначно определяющих положение и распределение скоростей тел системы в пространстве, выбраны обобщённые координаты и переменные, имеющие размерность импульсов. Предложен метод разрешения уравнений движения относительно старших производных, ориентированный на использование ЭВМ. Автору принадлежит вывод новой формы уравнений движения систем твёрдых тел, описание алгоритма разрешения уравнений движения с использованием несимметричного гауссова разложения матрицы системы, демонстрация всех этапов подготовки первичной информации и составления уравнений движения в представленной форме на примере механической системы с четырьмя степенями свободы.

3. Шимановский В. А. Метод компьютерного моделирования динамики систем связанных твёрдых тел // *Фундаментальные исследования*. — 2017. — № 8-1. — С. 104–109. (вклад автора 9 с./9 с.) **(ВАК)**

В статье представлен вывод алгоритма разрешения уравнений движения в лагранжевых переменных систем абсолютно твёрдых тел со структурой дерева относительно ускорений, ориентированный на использование ЭВМ. Алгоритм основан на применении схемы Холецкого для решения систем дифференциально-алгебраических уравнений движения. Проведено сравнение предлагаемого алгоритма с известными алгоритмами прогонки и показано его преимущество. Выполнены численные расчёты. Работа выполнена автором лично и без соавторов.

4. Иванов В. Н., Шимановский В. А. Численные методы формирования и решения уравнений движения в импульсах Пуассона систем твёрдых тел со структурой дерева // *Современные наукоёмкие технологии*. — 2017. — № 10. — С. 13–18. (вклад автора 4 с./6 с.) **(ВАК)**

В работе рассмотрены алгоритмы формирования и разрешения уравнений движения механических систем в гамильтоновых переменных, выписанных относительно расширенного состава переменных: обобщённых координат и импульсов, декартовых скоростей и импульсов. Предложены два алгоритма приведения уравнений движения к

нормальной форме ОДУ. Автору принадлежит описание алгоритмов разрешения, создание программ для ЭВМ и проведение серии численных экспериментов.

5. Ivanov V., Shimanovskiy V. Matrix Equations of the Motion of Multibody Systems with a Tree Structure in Hamiltonian Variables // Journal of Applied and Computational Mechanics. — 2023. — Vol. 9, no. 4. — P. 1107–1121. (вклад автора 7 с./15 с.) (**WoS, Scopus**)

В статье представлен вывод новой формы уравнений движения в гамильтоновых переменных на основе обобщённого принципа Гамильтона. Показано место выведенных уравнений в общей классификации форм уравнений. Проведён сравнительный анализ вычислительной сложности различных методов компьютерного моделирования многотельных механических систем. Автору принадлежит вывод рекуррентных формул для определения всех кинематических и динамических переменных, входящих в уравнения, алгоритм разрешения уравнений движения относительно старших производных без непосредственного их формирования, теоретические оценки численной эффективности различных методов моделирования. Автором выполнены разработка программ для ЭВМ и проведение серии численных экспериментов.

6. Шимановский В. А., Иванов В. Н. Анализ вычислительной эффективности матричных уравнений движения систем твёрдых тел со структурой дерева в гамильтоновых переменных // Инженерный вестник Дона. — 2023. — № 8(104). – С. 162-178. (вклад автора 12 с./17 с.) (**ВАК**)

В работе рассматривается применение уравнений движения в гамильтоновых переменных для моделирования динамики систем абсолютно твёрдых тел древовидной структуры. Автору принадлежит вывод уравнений движения с использованием понятий декартового и обобщённого импульсов, описание алгоритмов приведения уравнений движения к нормальной форме обыкновенных дифференциальных уравнений. Автором проведён анализ вычислительной эффективности различных алгоритмов математического моделирования динамики систем твёрдых тел. Результаты выполненного анализа представлены в виде диаграмм.

### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ**

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661787 Российская Федерация. Моделирование динамики механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами (D90): № 2015615714: заявл. 29.06.2015: опубл.

09.11.2015 / В. Н. Иванов, В. А. Шимановский, И. В. Домбровский, Ф. В. Набоков, И. Н. Емшанов; заявитель ЗАО «Специальное конструкторское бюро»; Бюл. № 12. — 1 с.

Программа предназначена для исследования динамики механической системы переменной кинематической структуры со следящими гидроприводами. Автору принадлежит описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661788 Российская Федерация. Моделирование влияния упругих свойств грунта на динамику механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами (D90grunt): № 2015615716: заявл. 29.06.2015: опубл. 09.11.2015 / В. Н. Иванов, В. А. Шимановский, И. В. Домбровский, Ф. В. Набоков, И. Н. Емшанов; заявитель ЗАО «Специальное конструкторское бюро»; Бюл. № 12. — 1 с.

Программа предназначена для моделирования влияния упругих свойств грунта на динамику механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами в составе комплекса программ D90. Автору принадлежит описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661789 Российская Федерация. Идентификация математической модели механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами (D90ident): № 2015615718: заявл. 29.06.2015: опубл. 09.11.2015 / В. Н. Иванов, В. А. Шимановский, И. В. Домбровский, Ф. В. Набоков, И. Н. Емшанов; заявитель ЗАО «Специальное конструкторское бюро»; Бюл. № 12. — 1 с.

Программа предназначена для определения параметров колебаний и упруго-демпфирующих характеристик механической системы переменной кинематической структуры со следящими гидроприводами. Автору принадлежит описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661790 Российская Федерация. Моделирование системы стабилизации колебаний механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами с предварительной компенсацией возмущений (D90komp): № 2015615721: заявл. 29.06.2015: опубл. 09.11.2015 / В. Н. Иванов, В. А. Шимановский, И. В. Домбровский, Ф. В. Набоков, И. Н. Емшанов; заявитель ЗАО «Специальное конструкторское бюро»; Бюл. № 12. — 1 с.

Программа предназначена для моделирования системы стабилизации колебаний механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами с предварительной компенсацией возмущений. Автору принадлежит описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661791 Российская Федерация. Построение оптимального управления динамическим поведением механической системы с переменной кинематической структурой со следящими гидроприводами (D90opt): № 2015615724: заявл. 29.06.2015: опубл. 09.11.2015 / В. Н. Иванов, В. А. Шимановский, И. В. Домбровский, Ф. В. Набоков, И. Н. Емшанов; заявитель ЗАО «Специальное конструкторское бюро»; Бюл. № 12. — 1 с.

Программа предназначена для построения оптимального управления механической системой переменной кинематической структуры со следящими гидроприводами. Автору принадлежит описание данного класса механических систем, синтез уравнений движения и реализация алгоритмов их решения в виде комплекса программ для ЭВМ.

В тексте диссертационной работы отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах по теме диссертации.

## **6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите**

Диссертация «Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных алгоритмов компьютерного моделирования динамики систем связанных твёрдых тел» Шимановского Владимира Александровича

соответствует паспорту специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по физико-математическим наукам.

#### 7. Соответствие диссертационной работы требованиям, «Положения о присуждении ученых степеней»

Диссертация Шимановского Владимира Александровича отвечает требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных алгоритмов компьютерного моделирования динамики систем связанных твёрдых тел» Шимановского Владимира Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заключение принято на заседании кафедры высшей математики.

Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0, протокол № 5 от «06» марта 2024 г.

Заведующий кафедрой

высшей математики,

доктор физ.-мат. наук, доцент

\_\_\_\_\_ /И.Е.Полосков/

Секретарь кафедры

высшей математики

\_\_\_\_\_ /Т.А.Шибалкина/

42.  
Подпись: И.Е. Полосков  
Т.А. Шибалкина  
Уч. зап. секретарь комиссии  
С.А. Аммосов