

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Орлова Степана Геннадьевича «Математические модели, алгоритмы и программный комплекс для расчёта динамики систем твёрдых деформируемых тел с многочисленными контактными взаимодействиями», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Использование методов математического моделирования при проектировании сложных технических систем является в настоящее время необходимостью. Это, в том числе, относится и к машиностроению вообще, и к автомобилестроению в частности. Значительное число задач в этой области относится к задачам механики, при этом множество этих задач состоит из многих разнотипных классов. Попытки создать универсальные средства математического моделирования для решения задач технического проектирования предпринимаются постоянно и имеют успехи. Например, применение пакетов программ широкого назначения, таких как ANSYS, NASTRAN и др. в сочетании с какими-либо системами CAD эффективно используются в авиастроении, космической промышленности, двигателестроении и многих других отраслях. Однако применение универсальных существующих пакетов дорого, требует тонкой настройки под конкретную задачу, эта настройка требует значительных затрат и не всегда возможна. Кроме того, решатели глобальных пакетов, в силу своей общей настроенности, часто работают неэффективно при решении конкретных локальных задач. В связи с этим, для решения определенных типов задач требуется специализированные пакеты программ, направленные на конкретную постановку, имеющие специальный проблемно-ориентированный набор моделей, которые решаются численными методами, ориентированными на данный определенный класс задач.

Диссертационная работа С. Г. Орлова посвящена проблеме детального предсказательного математического моделирования динамики бесступенчатой трансмиссии (вариатора) с пластинчатой цепью. Вариаторы широко используются в современном автомобилестроении и постоянно совершенствуются. Сложность этой проблемы обусловлена наличием большого числа упругих тел, находящихся в условиях контактного взаимодействия с трением, подбором или/и разработкой математических моделей такого взаимодействия, необходимостью эффективно и надежно численно решать системы ОДУ, обладающих большой жесткостью. Кроме того, необходимо удовлетворить потребность разработчиков вариаторов в специализированном программном обеспечении для предсказательного моделирования динамики этих устройств. Наличие такого программного обеспечения позволяет уменьшить количество опытных образцов, ускорить и удешевить производство и при этом повысить качество изделий. Все это определяет актуальность темы рассматриваемой диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа написана на 353 страницах. Список литературы включает 110 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы; представлен краткий обзор работ других авторов по моделированию бесступенчатых трансмиссий; определены цели и задачи диссертационного исследования; сформулированы положения, выносимые на защиту; перечислены публикации автора по теме работы.

Первая глава посвящена физическим и математическим моделям бесступенчатой трансмиссии. В ней представлена эволюция моделей, начиная от простейших, всего с несколькими степенями свободы, в которых цепь считается однородной лентой, и заканчивая наиболее сложными моделями, в которых каждый из многочисленных элементов цепи рассматривается как отдельное упругое тело. Во всех случаях для получения уравнений движения используется лагранжев формализм. Наибольший интерес представляет описание контактного взаимодействия при наличии трения — фактически рассмотрено несколько описаний разной сложности, в том числе контакт и кулоново трение как система неудерживающих связей, а также описание на основе контактной теории Герца и некоторым образом регуляризованной модели сухого трения, позволившие отказаться от дополнительных связей в механической системе. Подробное описание кинематики контактных поверхностей является основой для получения модели напряжённо-деформированного состояния цепи, близкого к реальному. В конце главы обсуждаются примеры численных решений; приведено сравнение некоторых численно полученных данных с экспериментальными.

Во второй главе автор исследует ряд методов численного решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) применительно к уравнениям движения наиболее сложной из рассмотренных математической модели вариатора. Ставится цель найти наиболее эффективные из них; при этом исследование ограничивается одношаговыми методами. В начале второй главы автор классифицировал систему ОДУ как умеренно жесткую. Показано, что классические явные методы Рунге-Кутты, а также явные экстраполяционные схемы являются малоэффективными для решения этой задачи. Такой же вывод делается и в отношении рассмотренных далее линейно- неявных методов типа Розенброка. Показано, что наиболее перспективными из рассмотренных методов оказались неявный метод трапеций и стабилизированный явный метод DUMKAZ — семейство явных схем, области устойчивости которых на комплексной плоскости сильно вытянуты в отрицательном направлении вещественной оси. Исследования осуществляются сочетанием аналитических и численных методов.

В третьей главе представлен разработанный автором специализированный программный комплекс для расчета динамики вариатора. Предложен ряд технологических решений для организации программного кода при разработке расширяемых программных систем и обеспечения эффективности его повторного использования. Преимущества предложенных технологий проиллюстрированы на примере системы автоматизированного создания документации пользователя. Как следует из приведенного описания, на основе разработанных программных технологий могут быть созданы и другие проблемно-ориентированные программные комплексы.

В четвертой главе рассмотрен созданный автором фреймворк для конструирования и исследования численных методов решения задачи Коши для систем ОДУ. В него включены методы, рассмотренные во второй главе. Классы фреймворка следуют принципу единственной ответственности, то есть каждый из них реализует минимальную функциональность. Архитектура классов фреймворка спроектирована таким образом, чтобы позволить разработчику создавать численные методы, комбинируя друг с другом уже имеющиеся элементы и при необходимости добавляя новые, максимально эффективно используя уже имеющуюся функциональность.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна обусловлена созданием ряда детализированных механических моделей, описывающих динамику вариатора с пластинчатой цепью. Разработана модель локального контактного взаимодействия с трением, основанная на контактной теории Герца и допускающая весьма эффективную численную реализацию. Создан специализированный программный комплекс, предназначенный для расчета динамики бесступенчатых трансмиссий и анализа численных решений; в его основу положен ряд созданных автором программных технологий, в частности, модель составного объекта. Разработан фреймворк для конструирования и исследования численных методов интегрирования систем ОДУ при наличии событий, в нем реализован ряд известных численных методов, адаптированных для решения ОДУ с событиями. Перечисленные результаты являются новыми.

Практическая ценность работы состоит в создании отчуждаемого программного обеспечения, предоставляющего возможность проводить проектирование рассматриваемых технических компонент на основе результатов математического моделирования.

Теоретическую значимость представляют предложенные автором механические модели трансмиссии и модели контактного взаимодействия; численно-аналитические исследования многочисленных методов численного решения систем ОДУ; представленные в диссертационной работе программные технологии.

Достоверность результатов работы обусловлена тщательным выбором рассматриваемых моделей и обоснованием предложенных новых моделей, подробным исследованием применимости используемых численных методов, сопоставлением результатов расчетов с экспериментом.

Основное содержание диссертации отражено в 28 печатных работах, 13 из которых опубликованы в журналах из списка ВАК. Личный вклад соискателя в эти работы значителен. Результаты диссертации докладывались на многих представительных российских и зарубежных конференциях и семинарах.

Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

К достоинствам рассматриваемой диссертационной работы относится фундаментальный подход к решению каждой из компонент поставленной задачи: выбору и построению механических моделей, определению надежных численных методов их решения, разработке и реализации программных средств. Автор проявил высокую математическую квалификацию, знание современных численных методов и методов разработки прикладных программ. Исследования численных методов для решения рассматриваемой системы ОДУ выходят далеко за рамки стандартного тестирования и представляют отдельный интерес.

К тексту диссертационной работы есть ряд замечаний. 1. В тексте содержатся стилистические погрешности и небрежности. Например, на стр. 240 «Предпочтение было отдано варианту с участком параболы, а не арктангенсу первое из равенств (1.298)», стр. 243 «соответствующие формы собственных колебаний, как уже говорилось, содержат осевые перемещения концов половинок пинов», стр. 257 «а лишь в качестве опорных методов для экстраполяции по Ричардсону эту идею можно найти в [84, п. 6.4.2]», и во многих других местах. 2. Неудачная форма нумерации формул, которая привела к существованию формул с номером типа (1.343). 3. В п.2.3 (стр.243) и далее обсуждаются собственные числа матрицы Якоби системы ОДУ, однако то, как эти числа получены, не указано, и читатель может сделать об этом косвенный вывод только после прочтения остального текста главы.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Диссертация написана на высоком научном уровне и представляет собой законченное самостоятельное научное исследование на актуальную тему, в работе решена важная научно-техническая задача. Представлены все этапы решения важной научной проблемы о конструктивном моделировании бесступенчатой трансмиссии: иерархическая последовательность математических моделей, выбор и адаптация численных методов, воплощение созданных моделей в специализированном программном комплексе и, наконец, сопоставление численных данных с экспериментальными. Содержание диссертация и результаты соответствуют паспорту специальности 05.13.18.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Орлов Степан Геннадьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

28.02.2019

Доктор физико-математических наук



Мухин Сергей Иванович

Организация – место работы: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Структурное подразделение: кафедра вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики

Должность: профессор

Почтовый адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2-й учебный корпус, факультет ВМК

Телефон: +7 916 114 51 19

Адрес электронной почты: vmmus@cs.msu.ru

Подпись и сведения заверяю.

