

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н. А. В. Бухановского 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

Актуальность темы

Диссертационная работа С. Г. Орлова посвящена теме предсказательного моделирования динамики бесступенчатых трансмиссий (вариаторов) с пластинчатой цепью. Актуальность этой темы обусловлена потребностями промышленности в совершенствовании конструкций вариаторов с целью улучшения их характеристик и тем самым обеспечения их конкурентных преимуществ. Использование специализированного программного обеспечения (ПО) для предсказательного моделирования значительно сокращает время и снижает стоимость разработки новых образцов изделий. В данном случае создание подобного ПО требует разработки весьма нетривиальных физико-математических моделей, описывающих динамику сложной механической системы, а также выбора подходящих методов численного интегрирования уравнений динамики.

Обзор содержания работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении описан основной объект исследования — вариатор с пластинчатой цепью; сформулированы цели и задачи работы, выносимые на защиту положения; дан краткий обзор работ других авторов по тематике работы.

Первая глава посвящена моделированию динамики вариатора с пластинчатой цепью на основе лагранжева формализма. В ней представлены как простые модели, в которых цепь рассматривается как однородная лента, так и сложные, учитывающие дискретную структуру цепи и деформации всех её элементов. Предложено несколько моделей контактного взаимодействия цепи с шайбой и элементов цепи между собой. Глава заканчивается серией расчетов, демонстрирующих возможности динамических моделей; приведено сравнение численных решений с имеющимися экспериментальными данными.

Во второй главе исследуются некоторые методы численного интегрирования системы уравнений динамики в применении к наиболее детализированной модели вариатора. В начале главы исследованы свойства системы уравнений и сделан вывод о её жесткости. Это обстоятельство, наряду с необходимостью отслеживать события при изменении состояния контактных пар, определило логику выбора численных методов. Были рассмотрены классические одношаговые явные схемы Рунге – Кутты; явные экстраполяционные схемы; линейно- неявные методы типа Розенброка; неявная схема трапеций; стабилизированный явный метод DUMKA3. Последние два метода позволяют значительно увеличить шаг интегрирования по сравнению с другими, поэтому сделан вывод об их эффективности (для неявной схемы — лишь потенциальной, так как для существенного повышения быстродействия требуется разработать эффективную процедуру вычисления якобиана правой части системы уравнений, что в работе не было сделано). Стабилизированный явный метод позволил увеличить быстродействие в 4–6 раз по сравнению с классическими явными методами Рунге – Кутты.

В третьей главе представлен разработанный автором программный комплекс для динамических расчетов гетерогенных систем и применяемый на практике для численного решения задач динамики вариатора. Комплекс представляет собой полнофункциональный программный продукт с широкими возможностями двумерной и трехмерной визуализации, подготовки расчетов и обработки их результатов, а также полноценной пользовательской документацией и поддержкой JavaScript в качестве языка сценариев. Описан ряд предложенных автором технологий, сделавших возможным создание этой и подобных программных систем маленьким коллективом разработчиков. Среди них — модель составного объекта, технологии поддержки свойств и методов, интеграции с встраиваемым языком сценариев, технология генерации актуальной пользовательской документации на основе объединения контента, созданного вручную, с контентом, сгенерированным автоматически, по результатам интроспекции дерева типов.

В четвертой главе дан обзор возможностей разработанного автором фреймворка `ode_num_int` открытым исходным кодом. Его потенциальный пользователь — исследователь, имеющий необходимость численного интегрирования задачи Коши для конкретной системы обыкновенных дифференциальных уравнений и желающий сконструировать эффективный численный метод для этой задачи, или выбрать один из уже реализованных методов. Архитектура фреймворка ориентирована на повторное использование кода, инкапсулированного в её компонентах, разработанных в соответствии с

принципом единственной ответственности, что облегчает создание новых решателей: обычно для этого требуется создать лишь некоторые компоненты нового решателя и скомбинировать их с уже реализованными в системе. Фреймворк реализует средства для вывода подробной информации о процессе решения, а также для измерения длительностей выполнения отдельных задач. Среди реализованных численных методов — те, что исследованы автором во второй главе. Для решения систем алгебраических уравнений на шаге неявной схемы предусмотрен итерационный метод ньютоновского типа, причём из реализованных компонентов можно собрать множество его разновидностей. Фреймворк `ode_num_int` использован в исследовании, рассмотренном во второй главе.

Заключение содержит перечень основных результатов диссертационной работы.

Новые теоретические результаты

В работе получен ряд новых теоретических результатов, относящихся к механике деформируемого твердого тела. Созданы динамические модели бесступенчатой трансмиссии, обеспечивающие качественно новый уровень детализации напряженно-деформированного состояния цепи по сравнению с другими моделями вариатора с пластинчатой цепью. На основе контактной теории Герца разработана модель локального контактного взаимодействия и эффективная методика расчета положений точек контакта.

Практическая значимость

Основной практически значимый результат работы — программный комплекс для предсказательного моделирования динамики вариаторов с пластинчатой цепью, используемый в промышленности. Его существование говорит о том, что полностью пройден путь решения сложной научно-технической проблемы детального предсказательного моделирования вариаторов. Другим практически значимым результатом работы является фреймворк `ode_num_int` для конструирования и исследования методов численного интегрирования начальной задачи для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Наконец, описанные в третьей главе программные технологии тоже представляются практически значимыми, так как на их основе возможно создание других проблемно-ориентированных программных комплексов.

Имеется ряд замечаний к диссертационной работе.

1) На стр. 272 главы 2 диссертант говорит о возможности использования методов распараллеливания вычислений, когда "каждый столбец матрицы Якоби в методе Ньютона можно вычислять в отдельном потоке". Однако далее утверждается, что для ускорения в 100 раз необходимо от 600 до 1800 ядер. Поскольку широко распространенных систем с общей памятью с такими процессорами в настоящее время не существует, по-видимому, речь идет о иерархическом распараллеливании между многоядерными узлами кластера. Однако диссертант ничего не сообщает о влиянии коммуникационной составляющей на эффективность распараллеливания (что принципиально для кластерных систем). Кроме того, в работе отсутствует экспериментальное подтверждение эффективности распараллеливания, анонсированного в разделе 2.6, полученное путем испытаний программного комплекса, описанного в главе 3.

2) Излагая важную часть диссертации по специальности 05.13.18 - описание программного комплекса (глава 3), диссертант использует неопределенные и нечеткие выражения, недопустимые при описании объектов техники и технологий. Например, на стр. 291 "маленькая часть функциональности реализована на языке...", на стр. 284 "...комплекс состоит примерно из 80 модулей...". Учитывая, что в законченном программном изделии количество модулей должно быть известно точно (согласно схеме деления и спецификации), подобные высказывания не согласуются с оценкой достоверности результатов исследования.

3) В главе 4 диссертант описывает среду для формирования процедур решения задачи Коши с использованием различных инструментальных компонентов, при этом называет ее "игровой площадкой для разработчика численных методов...". Однако пояснения причин использования термина "игровая площадка" на стр. 337 не являются убедительными, поскольку не формулируется ни цель игры, ни ограничения, а также сама система не участвует в игровом процессе. Скорее, эту разработку можно отнести к традиционным проблемно-ориентированным средам, PSE - Problem Solving Environment.

4) В диссертации наличествуют множественные отклонения от ГОСТ Р 7.0.11 в части оформления рисунков и таблиц.

Высказанные замечания снижают ценность полученных результатов, однако не являются критическими с точки зрения общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

В диссертационной работе автор продемонстрировал высокую квалификацию в механике, вычислительной математике и разработке прикладного программного обеспечения. Работа представляет собой законченное научное исследование; её результаты свидетельствуют о решении важной научной и практической проблемы предсказательного моделирования динамики бесступенчатых трансмиссий.

Автореферат диссертации адекватно отражает содержание работы. Основные результаты в полной мере опубликованы в рецензированных периодических изданиях из перечня ВАК и прошли апробацию на многочисленных международных конференциях.

Диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а её автор, Орлов Степан Геннадьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
Директор мегафакультета
трансляционных информационных
технологий

А. В. Бухановский

доктор технических наук

Подпись А. В. Бухановского заверяю:



В.И. / М.И. Мельникова В.И.
04.03.2019

199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 14-16

Телефон: +7(812) 337 64 94

E-mail: avb_mail@mail.ru