

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе Федерально-  
го государственного бюджетного образова-  
тельного учреждения высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный  
университет»



С.В.Микушев

« 11 » ФЕВРАЛЯ 2019 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации — Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» — на диссертацию ОРЛОВА Степана Геннадьевича «Математические модели, алгоритмы и программный комплекс для расчёта динамики систем твёрдых деформируемых тел с многочисленными контактными взаимодействиями» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Диссертационная работа С. Г. Орлова посвящена математическому моделированию движения бесступенчатой трансмиссии с пластинчатой цепью, состоящей из большого числа упругих тел, связанных контактными взаимодействиями. Целью работы является разработка физических и математических моделей бесступенчатой трансмиссии, обладающих разной степенью детализации, а также создание программного комплекса, обеспечивающего возможность моделирования динамики таких трансмиссий. Задачи предсказательного моделирования востребованы в промышленности, так как их решение позволяет значительно ускорить и удешевить разработку новых серийных образцов изделий. Системы инженерного анализа общего назначения, такие как ANSYS, ABAQUS и др., используются для расчетов напряженно-деформированного состояния отдельных элементов конструкции при заданных граничных условиях. Однако попытки применения таких систем к моделированию динамики всего устройства не дали положительного результата. Поэтому возникает необходимость разработки специализированных физических и математических моделей конструкции, пригодных для моделирования

её движения. Динамическим моделям бесступенчатых трансмиссий посвящено большое количество работ, ссылки на некоторые из них даны во Введении к диссертационной работе. Актуальность темы диссертационной работы обусловлена, прежде всего, новизной предложенных моделей — в них, в частности, впервые учтена податливость всех тел, составляющих пластинчатую цепь, что позволило в результате расчета динамики получить их напряженно-деформированное состояние. Не менее важным, чем моделирование, является создание программного продукта, при помощи которого конечный пользователь получает возможность практически осуществить подготовку исходных данных, выполнить расчеты и обработать численные решения.

### **Краткий анализ содержания работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

**Во Введении** обоснована актуальность работы, представлен краткий обзор работ других авторов по теме исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы выносимые на защиту положения, дан краткий обзор содержания глав.

**В первой главе** описана конструкция бесступенчатой трансмиссии с пластинчатой цепью, сформулирован общий подход к моделированию динамики, принятый в данной работе, даны некоторые количественные оценки, позволяющие судить о том, насколько допустимо принимать те или иные решения при моделировании движения. Далее рассматриваются различные физические и математические модели бесступенчатой трансмиссии и её отдельных элементов. Их можно разделить на «малые», в которых цепь считается однородной лентой, и «большие», учитывающие дискретную структуру цепи. Первые предназначены для моделирования глобальной динамики трансмиссии, вторые — для получения детальных данных о напряженно-деформированном состоянии элементов цепи, КПД, уровне шума. Рассмотренное в первой главе большое количество моделей в некоторой мере отражает процесс их эволюции на протяжении многих лет; те или иные изменения в моделях были продиктованы опытом практического использования. В наиболее сложной из всех моделей пластинки цепи рассматриваются как отдельные упругие элементы, а её соединительные оси (пины) — как пары обкатывающихся друг по другу половинок (правда, модель обкатки в работе не

представлена); контактное взаимодействие поверхностей пинов и шкивов валов рассматривается в рамках модели, основанной на контактной теории Герца, при этом учитывается кривизна поверхностей, что позволяет уточнить положение точек контакта. Глава заканчивается примерами расчетов, иллюстрирующих различия в моделях трансмиссии, а также сопоставлением некоторых экспериментальных данных с результатами моделирования.

**Во второй главе** исследуется поведение различных численных методов решения начальной задачи для систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), описывающих наиболее сложную из предложенных в первой главе моделей бесступенчатой трансмиссии. Сделанный в начале главы предварительный анализ показал, что систему ОДУ следует считать умеренно жесткой; с учетом этого производился выбор методов для рассмотрения. Цель исследования во второй главе — нахождение наиболее эффективных для данной задачи численных методов — представляет интерес, поскольку численное решение классическими явными методами Рунге–Кутты требует больших вычислительных затрат. Итогом второй главы стал вывод о высокой эффективности в применении к рассматриваемым задачам стабилизированных явных методов (рассмотрен метод DUMKA3), а также о перспективности неявного метода трапеций при условии доработки и распараллеливания процедуры вычисления матрицы Якоби правой части системы ОДУ.

**В третьей главе** дан обзор разработанного программного комплекса для моделирования динамики физически неоднородных систем, в частности — бесступенчатой трансмиссии с пластинчатой цепью. Рассмотрен ряд общих вопросов, возникающих при разработке проблемно-ориентированных программных комплексов, масштабируемых по своим функциональным возможностям. В частности, описана модель, определяющая организацию программных компонентов и их интерфейсов, а также ряд компонентов общей инфраструктуры (фабрика экземпляров, свойства, методы и др.). Основные итоги третьей главы состоят в том, что разработан проблемно-ориентированный комплекс для расчета бесступенчатых трансмиссий, а также в том, что создан ряд программных технологий, значительно облегчающий создание других программных комплексов небольшими коллективами разработчиков.

**Четвертая глава** посвящена описанию разработанного автором объединяющего ряд программ фреймворка (каркаса), предназначенного для исследования численных методов решения задачи Коши для систем ОДУ.

Его главной особенностью является возможность гибкого комбинирования компонентов, каждый из которых обладает минимальной функциональностью и решает всего одну строго определенную задачу (вычисляет матрицу Якоби, оценивает ошибку, выбирает вектор направления в итерации и пр.). Кроме того, предусмотрены средства для получения всей необходимой информации о процессе численного решения с возможностью её вывода. Фреймворк реализует ряд одношаговых методов Рунге–Кутты как явных, так и неявных, а также различные экстраполяционные схемы. Для решения систем нелинейных алгебраических уравнений на шаге неявного метода предусмотрен метод ньютоновского типа, конкретный вид которого может быть разным, поскольку окончательная программа составляется из отдельных готовых компонентов. Для решения систем линейных уравнений реализована специальная факторизация. Разработанный фреймворк использован при исследованиях в главе 2, что говорит о его работоспособности.

**В заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Достоверность полученных в диссертации результатов определяется выбором общеизвестного аппарата лагранжевой механики для описания динамики; корректным формальным применением математического аппарата при выводе уравнений Лагранжа; адекватными результатами в тестовых расчётах; удовлетворительным соответствием между имеющимися экспериментальными данными и численными решениями; многолетним опытом практического использования разработанного программного комплекса на предприятии, проектирующем бесступенчатые трансмиссии с пластинчатой цепью.

### **Оценка теоретической и практической значимости**

К теоретически значимым результатам диссертационной работы относятся предложенные модели движения бесступенчатой трансмиссии с пластинчатой цепью, а также модель локального контактного взаимодействия по Герцу с уточненным описанием кинематики.

Основными практически значимыми результатами являются разработанный программный комплекс для моделирования динамики бесступенчатых трансмиссий и фреймворк, описанный в главе 4. Кроме того, к практическим результатам следует отнести созданные автором программные

технологии, лежащие в основе разработанного программного комплекса, так как они могут быть применены при разработке других аналогичных программных комплексов.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В моделях не рассмотрено влияние некоторых дополнительных физических факторов, например, влияние изменения температуры.
2. В «малых» моделях не учтена растяжимость ленты в продольном направлении.
3. Сравнение экспериментальных данных с численными решениями недостаточно убедительно.
4. Не рассмотрены некоторые другие важные методы численного интегрирования систем ОДУ, например, многошаговые методы.
5. Глава 3 написана слишком поверхностно.

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

### **Заключение**

В целом диссертационная работа С.Г.Орлова представляется законченным научным исследованием. Тема исследования актуальна; в рамках диссертационной работы на высоком научном уровне решена важная научная проблема предсказательного моделирования динамики бесступенчатых трансмиссий.

В автореферате достаточно точно и полно отражено содержание диссертационной работы, перечислены её основные результаты и положения, выносимые на защиту. Все результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в список ВАК или систему SCOPUS.

На основании изложенного считаем, что диссертация С.Г.Орлова «Математические модели, алгоритмы и программный комплекс для расчёта динамики систем твёрдых деформируемых тел с многочисленными контактными взаимодействиями» соответствует критериям, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, предъявляемым

к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, 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.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры теоретической и прикладной механики математико-механического факультета ФГБОУ ВО СПбГУ, протокол заседания №79.08/20-04-01 от 7 февраля 2019 года.

Заведующий кафедрой теоретической  
и прикладной механики,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

П. Е. Товстик

Профессор кафедры теоретической  
и прикладной механики,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

М. П. Юшков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7\9.

Тел. (812)328-20-00; e-mail: [spbu@spbu.ru](mailto:spbu@spbu.ru)

Сайт: <https://spbu.ru/contacts/>

