

**Отзыв официального оппонента
доктора физико-математических наук
Степанова Сергея Яковлевича**

на диссертацию Борисова Андрея Валерьевича

**«ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ
СИСТЕМ СО ЗВЕНЬЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ
ПРИМЕНITЕЛЬНО К ЭНДО- И ЭКЗОСКЕЛЕТАМ»,**

**представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 01.02.01
Теоретическая механика**

1. Актуальность темы диссертации.

Рассматриваемые в диссертации механические стержневые системы со звеньями переменной длины относятся к частному виду систем многих тел (Multi Body System, MBS). Системам многих тел посвящена обширная мировая научная литература, одной из основных задач которой является разработка теории автоматизированного составления и исследования уравнений движения. В частности, моделированию опорно-двигательного аппарата человека, антропоморфного робота, экзоскелета посвящены работы Белецкого В.В., Виттенбурга Й., Виллемса П., Вукобратовича М., Мухарлямова Р.Г., Павловского В.Е., Формальского А.М., Черноусько Ф.Л., Янг Дж. Ф. и других. Известные из литературы модели экзоскелетов часто оказываются слишком энергоемкими и недостаточно комфортабельными в эксплуатации. В диссертации предпринята попытка улучшения этих эксплуатационных характеристик путем введения в систему звеньев с изменяющейся длиной и синхронизации их движений и развития теории таких систем.

2. Структура и основное содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений, имеет объем 257 страниц; список литературы содержит 344 наименования. Во **введении** сформулированы цель и задачи работы, описана структура диссертации.

В **первой главе** проведен анализ научной литературы по теме работы, описаны известные модели экзоскелетов и определено место диссертации среди имеющихся исследований. Предложена модель сферического шарнира-сустава в виде многослойной сферической системы с различными свойствами материала. Предложен метод определения изменения радиусов сфер под нагрузкой. Выявлены причины, вызывающие изменение длин звеньев. Определено понятие звена переменной длины применительно к антропоморфным системам.

Во **второй главе** рассматриваются математические модели стержневых систем со звеньями переменной длины для моделирования опорно-двигательного аппарата человека. Предложены две модели звеньев переменной длины. Первая в виде невесомого стержня и трех точечных масс (на концах стержня и между ними). Вторая модель обобщает первую на случай большего числа масс. Введено понятие точки ветвления применительно к ан-

тропоморфным системам. Для двумерной модели разработана матричная форма и рекуррентный алгоритм составления дифференциальных уравнений движения. Рассмотрены одноопорная, двухпорная, безопорная фазы движения: Кроме двумерных, рассмотрены также пространственные модели.

В третьей главе приведен строгий вывод дифференциальных уравнений для нескольких моделей звеньев переменной длины, применимых в экзоскелетах или антропоморфных роботах. Для первой модели проведено аналитическое исследование и доказаны существование, единственность и неограниченная продолжимость решения задачи Коши. Предложен рекуррентный метод построения уравнений стержневой системы со звеньями переменной длины. Проведен сравнительный анализ методов построения дифференциальных уравнений движения и показано, что быстродействие предлагаемых методов превосходит существующие. В приложении приведены тексты некоторых программ. Предложенные методы построения дифференциальных уравнений движения являются достаточно универсальными и могут применяться для других систем. В заключительном параграфе этот метод применен к модели движения многозвенника по горизонтальной плоскости.

В четвертой главе проведен численный анализ разработанных моделей. В отличие от систем с жесткими стержнями в уравнения входят силы, управляющие изменением длин звеньев. Для случаев двух и четырех звеньев исследовано явление синхронизации в различных режимах движения и управления. На антропоморфных моделях из пяти звеньев различной конструкции численно решены задачи управления движением экзоскелета на основе эмпирических формул; учета массы экзоскелета; влияния распределения масс на звене и т.д. Проведено численное решение системы дифференциальных уравнений движения экзоскелета с одиннадцатью звеньями, используя экспериментальные данные и решение обратной задачи динамики. Это решение демонстрирует возможность использования информации, получаемой от человека, для управления движением экзоскелета. Показано, что в модели со звеньями переменной длины ударные нагрузки на опорно-двигательный аппарат и требования к управляющим моментам в шарнирах-суставах снижаются, в сравнении со звеньями постоянной длины. В **заключении** перечислены основные результаты работы.

3. Степень новизны результатов, научных положений, которые выносятся на защиту диссертации.

Исследование механических систем со звеньями переменной длины можно расценивать как новое направление в теоретической механике. В диссертации предложены модели звеньев переменной длины и методы управления движением для таких систем:

- предложена модель многослойного сферического шарнира-сустава;
- разработаны новые модели звеньев переменной длины для моделирования опорно-двигательного аппарата человека, экзоскелетов и антропоморфных роботов;
- разработана программа для матричного рекуррентного алгоритма построения дифференциальных уравнений движения.

ния систем дифференциальных уравнений движения стержневых механических робототехнических систем;

- предложен алгоритм исследования стержневых систем типа экзоскелета со звеньями переменной длины различной конструкции в безопорной, одноопорной и двухопорной фазах движения;
- исследован механизм синхронизации звеньев кинематической цепи при движении человека и экзоскелета;
- исследовано влияние различных факторов на управление движением экзоскелета.

Анализируя уровень новизны основных результатов, изложенных в выводах, следует отметить следующее:

3.1. Предложена модель многослойного сферического шарнира-сустава и получены аналитические формулы распределения давления и изменения диаметра шарнира под нагрузкой.

3.2. Введены понятия звеньев переменной длины и точек ветвления для исследования моделей экзоскелета и опорно-двигательного аппарата человека.

3.3. Проведен анализ моделей звеньев переменной длины для опорно-двигательного аппарата человека и экзоскелетов различной конструкции в: одноопорной, безопорной, двухопорной фазах движения.

3.4. Предложен новый матричный рекуррентный алгоритм построения дифференциальных уравнений движения стержневой механической системы со стержнями переменной длины.

3.5. Изучено явление синхронизации при периодическом движении звеньев стержневых механических систем применительно к двуногой ходьбе человека в экзоскелете.

3.6. Решена прямая задача управления для экзоскелетов с постоянной и переменной длиной звеньев на основе экспериментальных данных и решения обратной задачи динамики.

3.7. Сопоставлены модели со звеньями постоянной и переменной длины. Сформулированы требования к элементам модели экзоскелета.

4. Обоснованность и достоверность заключительных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Сформулированные в диссертации выводы базируются на строгих методах теоретической механики, теории дифференциальных уравнений, математического моделирования и не вызывают сомнения.

5. Научная, практическая и экономическая значимость результатов и основных научных положений диссертации.

Применение разработанного в диссертации нового класса механических моделей механизмов со звеньями переменной длины может позволить улучшить эксплуатационные характеристики при проектировании экзоскелетов и антропоморфных роботов, а также при разработке методов протезирования и лечения опорно-двигательного аппарата человека. Практическая зна-

чимость подтверждается имеющимися актами внедрения. Диссертация выполнялась при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук и четырех грантов РФФИ.

6. Полнота опубликованности основных научных положений и результатов диссертации.

Результаты опубликованы в 14 статьях в журналах из перечня ВАК, 2 монографиях и 1 учебнике (в соавторстве). По теме диссертации всего имеется 36 публикаций. Результаты доложены на научных семинарах и тематических конференциях.

7. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите.

По предмету, методологии и характеру результатов диссертация соответствует специальности 01.02.01 – теоретическая механика и относится к физико-математическим наукам. Разработано новое направление – моделирование механических систем звеньями переменной длины, получено решение важных задач теоретической механики, возникающих при анализе процесса ходьбы человека, экзоскелета либо антропоморфного робота.

8. Оценка оформления работы.

Название диссертации автореферат правильно отражают содержание диссертации.. В тексте диссертации имеются необходимые иллюстрации. Параметры математических выражений расшифрованы. По каждой главе имеются выводы, которые обобщены в заключении.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Соискатель является сложившимся специалистом, владеющим методами теоретической механики и способным выполнить сложные научные исследования.

10. Недостатки диссертации.

10.1. В работе недостаточно полно проведено сравнение предлагаемых подходов с существующими методами автоматизированного построения дифференциальных уравнений движения систем многих тел (MBS) и компьютерными системами моделирования, в частности, на базе универсального языка динамического моделирования «Modelica».

10.2. Для проверки правильности полученной системы дифференциальных уравнений движения желательно было бы проверить совпадение результатов вычислений с результатами, полученными на основании других существующих подходов, в частности, на основании принципа Даламбера.

10.3. В четвертой главе говорится, что для исследования динамики выбрана максимально приближенная к человеку биомеханическая модель, состоящая из одиннадцати звеньев переменной длины. Такое утверждение представляется странным, учитывая, что число элементов человеческого скелета несопоставимо больше этого числа.

Вместе с тем отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы.

11. Заключение

Диссертация «Динамика механических стержневых систем со звеньями переменной длины применительно к эндо- и экзоскелетам» является законченным исследованием, выполненным на высоком научно-методическом уровне. По своей научной новизне, актуальности, сформулированной на основании полученных результатов, теоретической и практической значимости диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к докторским диссертациям. Содержание диссертации соответствует специальности 01.02.01 – теоретическая механика, а ее автор, Борисов Андрей Валерьевич, заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по данной специальности за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, выразившееся в создании нового научного направления в динамике механических систем типа эндо- и экзоскелета со звеньями переменной длины и разработке эффективных методов построения дифференциальных уравнений движения с произвольным конечным количеством звеньев, позволяющих решать важную научную задачу оптимизации конструкции экзоскелетов.

Официальный оппонент,
зав. отделом механики ВЦ ФИЦ ИУ РАН
доктор физико-математических наук (01.02.01)
Степанов Сергей Яковлевич



Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Адрес: 119333, Москва, ул. Вавилова, 40,
тел. (факс): 8-499-135-04-40 (8-499-135-61-59)
эл. почта: wcan@ccas.ru

