

Вх. № 3/24

от 26.02.2024г.

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук
Тырсына Александра Николаевича на диссертационную работу
Горбунова Дмитрия Владимировича
**«Математическое моделирование динамики движений биомеханической
системы человека»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность работы

Актуальность кандидатской диссертации Горбунова Д.В. заключается в разработке метода математического моделирования динамики движений и ее реализации в виде математической модели, что является важной задачей в технической, медицинской и спортивной практике. Биомеханическая система человека представляет собой сложную систему, включающую множество частей, которые взаимодействуют между собой и с окружающей средой. Изучение динамики движений биомеханической системы человека помогает определить оптимальный способ выполнения задач и предотвратить развития патологии или снизить риски возникновения травм.

Математическое моделирование является эффективным инструментом для изучения динамики движений биомеханической системы человека. Оно позволяет представить систему в виде математических уравнений, которые описывают движения различных частей тела, и провести анализ их свойств. Данный подход также позволяет оптимизировать способ выполнения движения, учитывая различные параметры. Для решения задач математического моделирования используются различные методы и подходы. Кроме того, для создания точной математической модели необходимо проводить экспериментальные исследования, собирать данные и исследовать закономерности в динамике движений биомеханической системы.

Исследования в области математического моделирования динамики движений биомеханической системы человека имеют большое значение для различных областей науки и технологий. Результаты подобного рода исследований могут быть использованы в медицинской практике, для разработки эффективных методов лечения и реабилитации травматических повреждений и нарушений осанки, а также для создания протезов и ортезов. В спортивной практике математическое моделирование динамики движений может помочь тренерам и спортсменам оптимизировать движения и повысить результативность тренировок. Также это может быть использовано в робототехнике для создания биомиметических роботов.

В целом, исследования в области математического моделирования динамики движений биомеханической системы человека имеют высокую актуальность и значимость для медицинской науки и практики. Разработка точных и надежных математических моделей позволяет более глубоко

понимать процессы, происходящие в организме человека, и, следовательно, создавать более эффективные методы лечения и профилактики различных заболеваний.

Более конкретно, в данной диссертации представлены новые математические модели для описания динамики движений биомеханической системы человека, основанные на принципах классической механики и биофизических закономерностях. Разработанные модели учитывают особенности структуры и функционирования отдельных мышечных пучков, взаимодействие между ними, а также учитывается работа отдельных мышечных волокон.

Научная новизна полученных результатов

Диссертация посвящена разработке математической модели биомеханической системы человека, которая позволяет описывать динамику движений. Новизна работы заключается в том, что создана комплексная модель, учитывающая взаимодействие различных элементов биомеханической системы – мышечные пучки с мышечными волокнами трех типов.

В области математического моделирования предложена оригинальная модель, основанная на дифференциальных уравнениях с разрывной правой частью, которые описывают различные режимы движения, такие как статический (проявление тремора), динамический (теппинг) и патологические процессы. Это позволяет более точно описывать процессы, происходящие в биомеханической системе человека, и создавать более точные прогнозы, что имеет большое значение для практического применения в медицине, физической реабилитации и спорте.

В области численных методов создано несколько алгоритмов, позволяющих эффективно решать полученные дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. Реализация разработанного метода математического моделирования в виде комплекса программ позволяет получать результаты с высокой эффективностью и скоростью, что существенно ускоряет процесс моделирования и позволяет быстрее получать результаты.

В области комплекса программ данная работа представляет собой интегрированный подход к моделированию биомеханической системы человека, который включает в себя несколько модулей, реализованных на высокоуровневом языке программирования и использующих различные библиотеки. Реализация данного подхода позволяет создавать более сложные модели биомеханических систем и более эффективно использовать вычислительные ресурсы, что важно для их применения в различных областях, связанных с медициной, реабилитацией и спортом, а также в области робототехники.

Таким образом, автором получены новые результаты по математическому моделированию динамики движений биомеханической системы человека в области математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

Обоснованность и достоверность результатов

Достоверность и обоснованность результатов в данной диссертационной работе обеспечиваются несколькими факторами. Во-первых, использование современных математических методов, включая дифференциальные уравнения с разрывной правой частью, численные методы решения и обработки данных, а также компьютерные технологии. Во-вторых, использование достаточно большой выборки экспериментальных данных, полученных в ходе исследований на людях и животных, а также их анализ и обработка. В-третьих, проверка результатов на соответствие известным экспериментальным данным, которые были использованы в моделировании, и сравнение с результатами других авторов, работающих в данной области. Все эти факторы гарантируют, что результаты данной диссертационной работы являются достоверными и обоснованными и могут использоваться для дальнейшего изучения динамики движений биомеханических систем человека и развития новых методов лечения и реабилитации.

Публикации и апробация результатов диссертационной работы

В ходе работы было опубликовано несколько статей в научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, в том числе в журналах, индексируемых в базах Scopus, Web of Science, MathSciNet и zbMath. Результаты диссертационной работы также были представлены на всероссийских и международных конференциях и семинарах. Автореферат отражает содержание работы.

Структура диссертационной работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений, содержит 167 страниц, 65 рисунков и 25 таблиц.

Во введении диссертации обоснована актуальность темы, приведена информация о степени разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи работы, описана научная новизна и практическая значимость исследования, а также объект и предмет исследования. Представлены методология исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов и личный вклад автора.

В первой главе рассмотрены методы анализа биомеханических систем, показана неопределенность в динамике их параметров и необходимость дополнительных исследований. Проанализированы методы и подходы к анализу и моделированию движений человека, в том числе теория хаоса-самоорганизации и теория дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Особое внимание уделено самоорганизации, которая существенно влияет на все процессы в биомеханических системах. Результаты исследования могут быть применены для создания эффективных моделей биомеханических систем и учета неопределенностей в динамике движений человека.

Во второй главе описывается методика проведения натурального эксперимента для выявления закономерностей в динамике движений биомеханической системы. Представлены методы анализа данных на основе методов математической статистики, термодинамики неравновесных систем и теории хаоса-самоорганизации. Эти методы позволяют выявлять и верифицировать закономерности в динамике движений биомеханической системы человека.

В третьей главе центральное место занимают исследования закономерности динамики движений биомеханической системы методами, представленными во второй главе.

В четвертой главе представлен метод математического моделирования функциональных системы человека, основанный на теории дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Рассмотрен частный случай математической модели для биомеханической системы человека. Кроме того, в главе описано численное решение в дискретной форме, разработанные алгоритмы и комплекс программы для проведения вычислительных экспериментов и анализа данных на основе методов, представленных в главе 2, а также закономерностей, изложенных в главе 3.

Пятая глава посвящена результатам проведения вычислительных экспериментов по воспроизведению хаотической динамики движений биомеханической системы человека, а также сравнительному анализу данных, полученных в ходе вычислительных экспериментов, с данными, полученными при проведении натуральных экспериментов.

В заключении изложены выводы, которые не противоречат полученным результатам.

Замечания по диссертационной работе

1. В диссертации отсутствует трактовка понимания сложной системы. Поэтому неясно утверждение в 1.1, что «Функциональные системы организма человека являются сложными системами и для их изучения требуется разработка новых методов математического моделирования». Как сложность повлияла на необходимость разработки новых методов математического моделирования. Возможно, достаточно лишь развить известные методы?

2. В диссертации под энтропией Шеннона (34), написанной с ошибкой, понимается функционал от плотности распределения непрерывной случайной величины, определенной по конечной выборке данных (гистограмме частот). Однако эта величина не является информационной энтропией К. Шеннона, в качестве которой понимают энтропию дискретного источника с конечным числом известных состояний. В диссертации рассматривались реализации непрерывных случайных процессов, никаких конкретных состояний у них не фиксировалось.

Используемая в работе энтропия значительно ближе к также предложенной Шенноном энтропии непрерывного распределения с плотностью $p(x)$, названной в дальнейшем дифференциальной энтропией, и равной

$H = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \log p(x) dx$. Этот несобственный интеграл при разбиении области интегрирования на конечное число L интервалов размера Δ приближенно равен $H \approx -\sum_{k=1}^L p_k \log p_k + \log \Delta$, где p_k – вероятность попадания случайной величины в k -й интервал. Т.е. формула (34) представляет собой смещенную на $\log \Delta$ оценку дифференциальной энтропии. Это следовало бы пояснить в тексте.

3. С учетом предыдущего замечания в диссертации нужно было исследовать влияние количества и величины интервалов разбиения значений сигнала, а также объема выборки, который в работе не приводится ни разу, на точность оценивания энтропии. Например, даже вид гистограмм на рис. 2.7, 2.8, 3.1, 3.2 говорит о том, что $L = 50, 200, 1000$ завышены. Проблема оптимального числа интервалов, обеспечивающего наибольшую близость ступенчатой гистограммы к фактической плотности распределения, хорошо известна в статистике.

4. В диссертации неоднократно отмечалась статистическая неустойчивость параметров функциональных систем организма человека и затруднения методов математической статистики для анализа статистической устойчивости процессов живых систем, в частности для биомеханических систем при изучении движений конечности человека (например, стр. 27-28 диссертации).

Используемая в диссертации энтропия представляет собой функционал от оценки плотности распределения (гистограммы частот распределения), определенной по конечной выборке данных. Поэтому здесь энтропия является не термодинамической, а статистической характеристикой, а, значит, согласно принятой в работе концепции, ее использование также затруднено. Желательно было в работе объяснить данное противоречие.

5. Слишком лаконичен параграф 2.2, не приведены хотя бы в виде обзора результаты статистической обработки данных. Возможно, этот параграф следовало объединить с параграфом 2.4.

6. В главе 4 для исключения высокочастотной компоненты из модельного сигнала применяется метод скользящего среднего. Следовало бы представить более детально обоснование выбора этого метода.

7. В дальнейшем, возможно, стоит рассмотреть использование более сложных моделей для учета биологических процессов, таких как метаболизм и дыхание, чтобы получить более полное представление о динамике движений человека.

8. В тексте диссертации и автореферата присутствуют опечатки в тексте и некоторых формулах, например в формулах (1), (2) автореферата, в формуле (34) диссертации.

Однако в целом работа представляет значимый вклад в развитие математического моделирования в биомеханике, используя численные методы и комплексы программ, а замечания носят рекомендательный характер для дальнейших исследований.

Заключение

Диссертационная работа Горбунова Дмитрия Владимировича «Математическое моделирование динамики движений биомеханической системы человека» является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842, а ее автор – Горбунов Дмитрий Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

Профессор кафедры «Прикладная математика и механика» Института естественных наук и математики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» профессор, доктор технических наук по специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел. +7 (343) 375-41-40, +7 9221007452
a.n.tyrsin@urfu.ru

«08» февраля 2024 г.



А.Н. Тырсин

Подпись А.Н. Тырзина заверяю
Ученый секретарь ученого совета УрФУ



В.А. Морозова