

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Соловьева Андрея Михайловича «Модели динамики неустойчивых механических и нейронных систем с гистерезисными связями», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### Актуальность

Явление гистерезиса хорошо известно в физике, технике, экономике и других отраслях науки. В частности, в физике гистерезисные зависимости встречаются у различных материалов с нелинейным откликом на внешнее воздействие, например, у ферромагнетиков и нелинейных диэлектриков. В настоящее время имеется большое количество математических моделей гистерезисных зависимостей, многие из которых построены на решении нелинейных дифференциальных уравнений, либо на введении нелинейных гистерезисных членов в линейные уравнения. Подобным образом построены модели Боука-Вена, Хаузера, Джилеса-Атертона и др. Использование нелинейных уравнений ведет к значительному усложнению модели из-за того, что трудно получить универсальное решение и интерпретировать результаты. Альтернативным подходом к построению такого рода математических моделей является теория, созданная М.А. Красносельским и А.В. Покровским, формализующая общие методы описания и исследования широких классов систем с гистерезисом.

Большое количество математических описаний гистерезиса обусловлено достаточно богатым набором прикладных задач, в которых носители гистерезиса нельзя рассматривать изолированно, поскольку они являются частью некоторой более сложной системы. Примером такой системы может

служить биологическая нейронная сеть головного мозга человека, представляющая собой, по сути, чрезвычайно сложный, нелинейный, параллельный компьютер. Он обладает способностью организовывать нейроны так, чтобы они могли выполнять конкретные задачи во много раз быстрее, чем самые быстродействующие современные компьютеры. Имитация работы нейронов головного мозга с помощью искусственной нейронной сети (ИНС) является важной и актуальной задачей. На эффективность работы ИНС влияют многие факторы, в том числе свойства, заимствованные от биологических нейронов головного мозга, такие как пластичность и кратковременная память. Способность к пластичности достигается построением рекуррентных самообучающихся ИНС, наличие же кратковременной памяти возможно достигнуть разными способами, одним из которых является использование гистерезисной функции активации (ГФА) нейронов сети. Следует заметить, что в настоящий момент не существует развитых алгоритмов построения ИНС с ГФА, не смотря на их очевидные преимущества для определенного класса задач, таких как классификация образов. Таким образом, разработка алгоритмов построения и функционирования таких ИНС крайне важна и актуальна.

Другой задачей, в которой появляется необходимость математического описания гистерезисной нелинейности в составе сложной механической системы, является задача стабилизации обратного гибкого маятника в условиях гистерезисного управления. Аналоги подобных механических систем можно встретить в совершенно различных технических приложениях от медицины и биологии до роботостроения, ракетных и космических технологий. Отмечу, что большинство работ, посвященных данной тематике, рассматривают упрощенную модель обратного маятника, не в полной мере соответствующую реальной механической системе. Учитывая же люфт в точке крепления (гистерезисный характер управления) и рассматривая случай гибкого стержня, можно добиться большего соответствия математической модели реальным механическим системам, однако в этом случае задача

стабилизации существенно усложнится. Тем не менее, учет и корректное математическое моделирование гистерезисных нелинейностей совершенно необходимо для адекватного описания динамики сложных систем.

Еще одним примером сложной системы с гистерезисной нелинейностью является механическая система с гистерезисным демпфером. Демпфирование имеет достаточно обширную область применения. В настоящее время широкое распространение получило вязкое демпфирование, основанное на диссипации энергии колебаний за счет вязкого трения. Однако этот вид демпфирования имеет существенный недостаток – ярко выраженный частотозависимый характер основных показателей эффективности. Одним из способов устранения этого недостатка является использование нелинейного вязкого демпфирования высоких порядков, а также гистерезисного демпфирования. В настоящее время это направление развито недостаточно, несмотря на широкий круг прикладных задач, решаемых с помощью демпфирования. Таким образом, исследование динамики гистерезисного и вязкого демпферов, а также их сравнительный анализ, является актуальным и важным как с прикладной так и с теоретической точек зрения.

### **Новизна исследований и полученных результатов**

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработаны принципы построения ИНС с ГФА, проведено исследование их динамики и показан ряд важных преимуществ (повышенная помехоустойчивость нейронов с ГФА и наличие ассоциативной памяти двухслойной ИНС с ГФА в задаче классификации образов).
2. Разработан алгоритм стабилизации обратного гибкого маятника и предложен метод оптимизации по параметрам управляющего воздействия с помощью бионического алгоритма адаптационного поискового поведения в рамках анимат-подхода.
3. Проведено исследование математической модели гистерезисного демпфера

колебаний на основе материала Ишлинского и выполнен сравнительный анализ вязкого и гистерезисного демпферов. Показан ряд важных преимуществ гистерезисного демпфирования (повышенная эффективность как в области резонанса системы, так и за ее пределами).

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений**

Обоснованность и достоверность проведенных исследований подтверждается строгостью доказательств, утверждений и наложенных ограничений, обоснованностью используемого математического аппарата, а также результатами многочисленных численных экспериментов, наглядно показавших правильность сделанных выводов.

### **Практическая значимость работы**

Проведенные в настоящей работе исследования могут быть использованы в ряде прикладных задач. Так предложенные алгоритмы построения ИНС с ГФА позволят качественно улучшить работу ИНС, повысив ее помехозащищенность и привнеся в нее ряд важных свойств. Разработанные методы стабилизации обратного гибкого маятника с гистерезисным управлением, а также алгоритм оптимизации управляющего воздействия, могут послужить основой для различных аппаратно-программных средств стабилизации неустойчивых объектов с гистерезисными связями. Предложенный метод построения гистерезисного вибрационного демпфера на основе материала Ишлинского может значительно повысить эффективность демпфирующих устройств, активно применяющихся в машиностроении, тяжелой промышленности, при строительстве зданий и сооружений и т.п.

## Замечания по диссертационной работе

1. Автор использует в качестве модели гистерезиса в нейронах ИНС конечномерную аппроксимацию преобразователя Преисаха с фиксированным числом неидеальных реле. Однако в работе отсутствует исследование зависимости динамики работы нейронов как от числа неидеальных реле, так и от формы распределения весовых коэффициентов. Следует отметить, что такое исследование было бы целесообразным, и позволило бы оптимизировать модель, добившись в итоге оптимального соотношения скорости работы ИНС и используемых ею машинных ресурсов.
2. Решение задачи стабилизации обратного гибкого маятника в условиях гистерезисного управления производится с помощью численных методов с применением предложенных автором разностных схем. Отметим, что в качестве обоснования использования неявной разностной схемы автор приводит доказательство устойчивости данной схемы относительно возмущения начальных параметров. Однако, отсутствует исследование устойчивости явной разностной схемы и метода кусочно-линейной аппроксимации. Такое исследование позволило бы провести более подробный сравнительный анализ эффективности использования предложенных разностных схем.
3. В пятой главе посвященной гистерезисному демпферу используется математическая модель материала Ишлинского. Отмечу, что эта модель позволяет описать реальный упруго-пластичный материал с заданными свойствами. Таким образом, было бы целесообразно в процессе численного эксперимента использовать параметры материала Ишлинского соответствующие его реальному прототипу.
4. К сожалению автором в диссертационной работе недостаточно ясно сформулирована связь между механическими системами с демпфирующим звеном гистерезисной природы и искусственными нейронными сетями.

## **Общая характеристика диссертационной работы**

Вместе с тем, отмеченные недостатки не снижают общего позитивного впечатления от работы и не ставят под сомнение ее положительную оценку. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. В нем в лаконичной форме ясно изложены основные идеи и выводы по работе, показана степень новизны и практическая значимость проведенных автором исследований.

## **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученой степени**

На основе анализа диссертационной работы Соловьёва А.М. «Модели динамики неустойчивых механических и нейронных систем с гистерезисными связями» можно сделать следующие выводы:

- 1 Диссертация является научно-квалифицированной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решен ряд важных научных задач.
- 2 Диссертация представляет собой завершённую работу, обладающую внутренним единством, содержит новые научные результаты и подходы. Её тематика соответствует п.1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», п.2 «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей», п.4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» и п.5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» паспорта специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы

и комплексы программ».

- 3 Работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Соловьёв Андрей Михайлович, достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,  
д.т.н., профессор, ФГБОУ  
ВГУИТ

Тихомиров Сергей Германович

14.07.2017 г.

Воронежский государственный университет  
инженерных технологий  
394036 Россия, г. Воронеж, пр. Революции, д.  
19;  
телефон +7(473)255-38-75;  
e-mai: tikhomirov\_57@mail.ru

