

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию Егорчева Михаила Вячеславовича «**Полуэмпирическое нейросетевое моделирование нелинейных динамических систем**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

По мере роста сложности создаваемых технических систем растут и требования к их моделям, что, в свою очередь, приводит к отставанию возможностей средств математического и компьютерного моделирования от потребностей таких важнейших областей как авиация и ракетно-космическая техника, робототехника, управление сложными производственными процессами и т.п. Характерным для технических систем из этих областей является высокий уровень сложности моделируемых объектов и процессов, их многомерность, нелинейность и нестационарность, многообразие и сложность функций, реализуемых моделируемым объектом. Решение проблем моделирования таких систем обычно осложняется неполным и неточным знанием характеристик и свойств моделируемого объекта, а также условий, в которых он будет действовать. Кроме того, моделируемый объект может претерпевать изменения в его свойствах, в том числе резкие и существенные, непосредственно в процессе функционирования, например, вследствие отказов оборудования и повреждений в его конструкции. Это порождает критическую ситуацию в случае когда, например, эта модель используется в составе системы управления летательного аппарата. В связи с этим, *актуальным* является поиск новых средств моделирования сложных нелинейных управляемых динамических систем, действующих в условиях существенных и разнородных неопределенностей. Эти средства должны обеспечивать получение моделей с требуемым уровнем точности и быстродействия, которые, при необходимости, можно использовать в реальном и/или опережающем времени в составе бортовых комплексов управляемых объектов. Получаемые модели должны обладать свойством адаптивности для оперативного восстановления адекватности модели при изменениях в свойствах моделируемой системы. Традиционные модели динамических систем в форме дифференциальных уравнений при всех их несомненных достоинствах не удовлетворяют условию адаптивности. Требуемым свойством адаптивности обладают модели на основе искусственных нейронных сетей, представляющие собой мощное средство моделирования нелинейных многомерных статических и динамических систем, в особенности при наличии значительного числа разнородных неопределенностей в моделируемых системах и условиях их использования.

Однако точность нейросетевых моделей на экспериментальных данных, не используемых при построении модели (обобщающая способность) существенно зависит от репрезентативности обучающего набора данных, а также от количества настраиваемых параметров модели. Так, при достаточно малом размере обучающего набора и достаточно большом количестве настраиваемых параметров, точность модели на тестовом наборе данных может быть крайне низкой. В рамках традиционного нейросетевого подхода объект моделирования предполагается полностью неизвестным, т.е. рассматривается как «черный ящик», а соответствующие НС-модели формируются исключительно на основе экспериментальных данных о поведении динамической системы. В связи с этим, перспективной представляется задача развития гибридного, полуэмпирического нейросетевого подхода к моделированию, позволяющего формировать нейросетевую модель с привлечением как теоретических знаний в соответствующих предметных областях, так и методов обучения моделей, характерных для искусственных нейронных сетей. Данный подход позволяет уменьшить количество настраиваемых параметров по сравнению с чисто эмпирическими нейросетевыми моделями, сохранив при этом достаточную гибкость и возможность адаптации.

В связи с этим, *целью* диссертационной работы М.В. Егорчева является развитие класса полуэмпирических нейросетевых моделей управляемых динамических систем, объединяющих возможности теоретического и нейросетевого моделирования, а также методов их обучения. Это развитие состоит в распространении на случай непрерывного времени методов, ранее предложенных для случая систем с дискретным временем. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения.

Во *введении* обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель и ставятся задачи, которые требуется решить в работе.

В *первой главе* приводится постановка задачи математического моделирования детерминированных управляемых нелинейных динамических систем с сосредоточенными параметрами. Традиционным классом математических моделей таких систем являются системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Показано, что модели этого вида обладают существенным недостатком с точки зрения придания им свойства адаптивности, т.е. способности модели восстанавливать адекватность объекту моделирования в случае, когда свойства этого объекта изменились по каким-либо причинам (отказы оборудования, повреждения конструкции). В качестве альтернативного варианта рассматривается нейросетевой подход к моделированию динамических систем, позволяющий удовлетворить требованию адаптивности. Решение предлагается искать в классе рекуррентных нейронных сетей, проводится анализ возможностей таких сетей с традиционной архитектурой, подходы к организации их обучения, выявляются возникающие при этом проблемы. При этом показано, что такого рода традиционные нейросетевые модели, реализующие концепцию «черный ящик», обладают серьезными ограничениями по уровню сложности задач, решаемых для моделируемых объектов. В то же время, для таких объектов, как правило, существуют некоторые теоретические знания относительно их структуры, особенностей поведения и т.п. Если эти знания учесть каким-либо образом при формировании нейросетевой модели динамической системы, то появляется возможность удовлетворить требованиям как по адаптивности получаемой модели, так и по уровню сложности решаемых прикладных задач. В связи с этим, данный подход («серый ящик») предлагается использовать для решения задачи, поставленной в диссертационной работе.

Во *второй главе* предлагается гибридный, полуэмпирический подход к моделированию, позволяющий формировать модель с использованием как теоретических знаний предметной области, так и экспериментальных данных о реакции системы на внешние воздействия, т.е. реализация класса моделей типа «серый ящик». Анализ полуэмпирических моделей показывает, что, хотя в общем случае они не являются универсальными аппроксиматорами непрерывных функций, они позволяют с любой заданной точностью аппроксимировать функции того вида, который был задан, исходя из теоретических знаний об объекте моделирования. Описаны этапы процедуры формирования полуэмпирических нейросетевых моделей. Применение данной процедуры подробно демонстрируется на примере простой динамической системы. Затем данная процедура применяется для формирования структуры полуэмпирических нейросетевых моделей движения самолета для случаев продольного углового, полного углового и продольного траекторного движения.

Третья глава посвящена исследованию методов обучения полуэмпирических нейросетевых моделей динамических систем. В отличие от ранее известных моделей данного класса, которые были определены в дискретном времени, в диссертации введены соответствующие модели в непрерывном времени. Соответственно, требуется получить алгоритмы обучения, также формулируемые в непрерывном времени. Несмотря на то, что при реализации данных алгоритмов на ЭВМ разностная аппроксимация все же потребуется, данные формулировки дают дополнительную гибкость в выборе используемых разностных схем. В силу ряда сложностей, связанных с обучением рекуррентных нейронных сетей, анализируемых в диссертации, лишь для небольшого набора начальных значений параметров сети удастся найти достаточно глубокий минимум с помощью градиентных ме-

тодов оптимизации. В качестве подхода, позволяющего справиться с этими сложностями, в работе предлагается вместо традиционной задачи минимизации функции ошибки сети сформировать и решить такую последовательность задач, в которой первая задача является достаточно простой и ее решение может быть найдено для любых начальных значений параметров, а каждая последующая задача схожа с предыдущей и их решения близки в пространстве значений параметров; последовательность сходится к исходной, требуемой задаче. Данная идея лежит в основе метода продолжения решения по параметру, который и реализуется в диссертации применительно к рассматриваемой задаче обучения полуэмпирических рекуррентных нейронных сетей. Предлагается гомотопия функции ошибки, позволяющая варьировать величину горизонта прогноза и на этой основе строится требуемый обучающий алгоритм. Несмотря на то, что выражения для функции ошибки и ее производных в предлагаемом подходе являются точными, использование численных методов для решения соответствующих задач Коши и для вычисления определенного интеграла по времени, а также для интерполяции целевых значений наблюдаемых выходов вносит в них определенную погрешность. Анализируется асимптотическое поведение этой погрешности в зависимости от величины шагов по времени, в предположении, что неустранимая погрешность отсутствует. Также в данной главе предлагаются варианты для случая непрерывного времени традиционных обучающих алгоритмов для рекуррентных сетей, а именно, для алгоритма обратного распространения во времени и для алгоритма рекуррентного обучения в реальном времени. Здесь же рассматривается критически важная задача формирования репрезентативного набора данных, характеризующего поведение моделируемой системы на всей области допустимых значений переменных состояния и управления. Для получения такого набора предлагается подход к получению эффективного плана эксперимента на основе декомпозиции управляющих сигналов на две составляющие – опорный маневр и возмущающее воздействие.

В *четвертой главе* приведены результаты обширной серии вычислительных экспериментов по обучению полуэмпирических нейросетевых моделей движения применительно к случаю маневренного самолета. Полученные результаты показывают, что ошибки по всем наблюдаемым переменным незначительны и, кроме того, максимальные значения этих ошибок с течением времени практически не растут, что свидетельствует о хороших обобщающих свойствах полученной нейросетевой модели. Кроме того, помимо формирования модели движения самолета в целом, одновременно решается задача идентификации неизвестных аэродинамических характеристик самолета. При этом, в отличие от традиционного подхода к решению данной задачи, не используется линеаризация искомым характеристикам, а они определяются как нелинейные функции многих переменных, определенные для всей области функционирования рассматриваемого объекта моделирования. Показано, что нейросетевой полуэмпирический подход позволяет решать задачу идентификации аэродинамических характеристик самолета с высокой точностью.

В *заключении* диссертации приведены общие выводы, которые позволяют сделать полученные результаты. Они состоят в том, что методы нейросетевого моделирования в сочетании со знаниями и опытом из соответствующей предметной области, а также из традиционного вычислительного моделирования, являются мощным и перспективным инструментом, потенциально пригодным для решения сложных прикладных проблем для управляемых систем различных классов, в частности, для решения задач моделирования движения и управления для летательных аппаратов различных видов.

В ходе работы над диссертацией Егорчев М.В. зарекомендовал себя как квалифицированный математик и грамотный программист, способный ставить и решать оригинальные задачи. Соискатель активно публикует результаты своих исследований и разработок. Основные результаты по теме диссертации изложены в 21 публикации, среди которых 6 в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 6 статей в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 1 статья в журнале, индексируемом в Web of Science, 8 публикаций, индексируемых в РИНЦ. Соискателем получено свидетельство о государственной регистрации

программного комплекса «Нейросетевое полуэмпирическое моделирование управляемого движения летательных аппаратов». Полученные результаты неоднократно докладывались на научных конференциях международного и всероссийского уровня.

Соискатель Егорчев М.В. является вполне сложившимся научным работником, который может самостоятельно выявлять актуальные научные проблемы, формировать подходы к их решению, а также реализовывать эти подходы с доведением их до уровня соответствующих программных комплексов. Его диссертация «Полуэмпирическое нейросетевое моделирование нелинейных динамических систем» представляет собой законченную научно-исследовательскую и научно-квалификационную работу. Она содержит новые оригинальные результаты, выполнена на высоком научном уровне и отвечает всем требованиям ВАК РФ. Считаю, что ее автору, Егорчеву Михаилу Вячеславовичу, может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Профессор кафедры «Вычислительная математика и программирование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н. по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)»

Ю.В. Тюменцев

Подпись Тюменцева Ю. В. заверяю:

Декан факультета информационных технологий и прикладной математики Московского авиационного института (национального исследовательского университета)



С. С. Крылов