

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Егорчева Михаила Вячеславовича на тему

«Полуэмпирическое нейросетевое моделирование нелинейных динамических систем», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18

«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Традиционными классами математических моделей для управляемых динамических систем (ДС) являются обыкновенные дифференциальные уравнения (для систем с сосредоточенными параметрами) и дифференциальные уравнения в частных производных (для систем с распределенными параметрами). Применительно к системам первого из этих двух видов, изучаемым в диссертации, методы формирования и использования таких моделей к настоящему времени достаточно детально разработаны и с успехом используются для решения широкого круга задач. Однако применительно к современным и перспективным сложным техническим системам возникает ряд проблем, решение которых не может быть обеспечено традиционными методами. Эти проблемы вызваны наличием разнообразных и многочисленных неопределенностей в свойствах соответствующей системы и в условиях ее функционирования, которые можно преодолеть, только если рассматриваемая система обладает свойством адаптивности, то есть имеются средства оперативной частичной перестройки системы и ее модели к изменившимся условиям решения задачи. Как показывает имеющийся опыт, аппаратом моделирования, наиболее приемлемыми для практического использования, являются методы и средства, основанные на концепции искусственной нейронной сети (НС). Такой подход можно рассматривать как альтернативу традиционным методам моделирования ДС, обеспечивающую, в том числе, возможность получения адаптивных моделей. Однако наиболее часто используемые НС-модели ДС, в частности модели типа «черный ящик» классов NARX и NARMAX, при анализе управляемых динамических систем в целом ряде случаев не позволяют добиться необходимого уровня достоверности, обеспечивающего, например, решение задач управления движением летательных аппаратов. Учитывая высокую востребованность математических моделей ДС в задачах разработки таких систем и их эксплуатации, **актуальной** является решение проблемы формирования моделей, обладающих требуемым уровнем прогностической достоверности, а также свойством адаптивности, т.е. способностью поддерживать адекватность модели объекту моделирования, несмотря на изменение свойств данного объекта, обусловленных его развитием.

Для решения сформулированной проблемы в диссертации предлагается использовать комбинированный (полуэмпирический) подход к моделированию ДС, основанный на совместном использовании как эмпирических данных о поведении моделируемого объекта, так и теоретических знаний о нем. Развитие данного подхода применительно к рассматриваемому классу систем составляет основное содержание работы. Это развитие, являющееся основной **целью** диссертационного исследования, состоит в распространении результатов, полученных ранее при полуэмпирическом

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. №

10 06 20 19

НС-моделировании ДС, на случай систем с непрерывным временем, что позволяет существенно повысить эффективность данного подхода.

Для достижения поставленной цели автором диссертации сформулирован ряд **задач** исследовательского характера, связанных как с развитием теории и распространения существующих результатов на случай НС-моделирования в пространстве состояний и непрерывном времени, так и необходимостью получения ряда результатов, относящихся к вычислительным алгоритмам, обеспечивающим решение задачи обучения формируемых полуэмпирических НС-моделей. Кроме того, одна из важнейших задач, решаемых автором диссертации в процессе формирования таких моделей, состоит в получении репрезентативного обучающего набора, для чего потребовалось разработать соответствующие алгоритмы планирования эксперимента и формирования такого набора. Больших усилий от соискателя ученой степени потребовала также необходимость реализации обширной серии вычислительных экспериментов, которые, во-первых, обеспечили отработку создаваемых алгоритмов и, во-вторых, позволили оценить эффективность предлагаемого полуэмпирического НС-подхода к моделированию нелинейных управляемых ДС, а также его возможности для решения задач идентификации характеристик таких систем.

В ходе рассматриваемого диссертационного исследования, при решении перечисленных выше задач, М.В. Егорчевым получены **новые научные результаты**. В первую очередь, это распространение полуэмпирического НС-подхода к математическому моделированию управляемых динамических систем на случай непрерывного времени, что существенно повышает вычислительную эффективность процесса формирования соответствующих моделей. Разработан ряд численных алгоритмов, реализующих процесс обучения полуэмпирических НС-моделей, в том числе, два алгоритма оценки значений градиента и матрицы Гессе функции ошибки для полуэмпирической НС-модели в пространстве состояний и непрерывном времени, представляющие собой непрерывные версии известных алгоритмов RTRL и ВРТТ, а также численный алгоритм обучения полуэмпирической НС-модели в пространстве состояний и непрерывном времени, основанный на методе продолжения по параметру с функцией гомотопии, в которой в качестве параметра используется величина горизонта прогноза. Кроме того, для формирования репрезентативного обучающего набора разработан соответствующий численный алгоритм, основанный на декомпозиции управляющих сигналов на опорный маневр, максимизирующий критерий дифференциальной энтропии, и возмущающее воздействие, минимизирующее пик-фактор.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Разработанные полуэмпирические НС-модели представляют собой эффективный инструмент анализа и идентификации нелинейных управляемых динамических систем. Он дает возможность значительно уменьшить число настраиваемых параметров в формируемой модели, что, в свою очередь, позволяет существенно снизить объем обучающего набора данных, либо, при фиксированном объеме такого набора, улучшить обобщающие свойства получаемой модели. Предложенный алгоритм обучения полуэмпирических НС-моделей, основанный на методе продолжения решения по параметру, повышает эффективность процесса и использования таких моделей, а разработанный диссертантом алгоритм планирования экспериментов позволяет обеспечить этот алгоритм информативным

обучающим набором. Полученный класс моделей и средств работы с ними может найти широкое применение при решении задач моделирования движения и идентификации характеристик нелинейных многомерных систем, в том числе и систем с многоканальным управлением. Потенциальные возможности предложенного подхода подтверждаются результатами обширной серии вычислительных экспериментов.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации М.В. Егорчева теоретических результатов обеспечена корректным применением математического аппарата, использованного для получения этих результатов, а численных алгоритмов – результатами многочисленных вычислительных экспериментов, а также сопоставлением этих результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Общая характеристика диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Её общий объем составляет 155 страниц текста, в котором содержится 35 рисунков и 5 таблиц. Список литературы диссертации включает 132 наименования.

Введение посвящено изложению исследуемой проблемы, а также анализу литературы по проблеме. Обоснованы актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель работы и задачи, которые требуется решить для достижения поставленной цели. Дана оценка планируемых результатов, представленных в последующих главах, по критериям научной новизны и практической значимости.

В первой главе сформулирована задача математического моделирования для детерминированных управляемых ДС с сосредоточенными параметрами, которые в традиционном варианте описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ). Для ОДУ выявляются их достоинства и недостатки в качестве инструмента решения задач моделирования и идентификации ДС. Требование устранить основной недостаток моделей в виде ОДУ – отсутствие у них свойства адаптивности, приводит к альтернативному подходу к решению задач моделирования ДС, который основан на использовании аппарата НС-моделирования. Данный альтернативный подход сопоставлен с подходом на основе ОДУ, проведено сравнение их возможностей. Показано, что использование НС-подхода в его традиционном варианте для моделирования нелинейных управляемых динамических систем также сопряжено с рядом проблем, которые являются следствием того, что традиционные НС-модели относятся к моделям типа «черный ящик».

Во второй главе рассматриваются методы решения задач, характерных для моделей типа «черный ящик» в их нейросетевом исполнении. В качестве основного предлагается встраивание в НС-модель фрагментов, отвечающих имеющемуся уровню теоретических знаний по объекту моделирования, который при подходе типа «черный ящик» полностью игнорируется. Показано, что этот вариант позволяет существенно снизить число настраиваемых параметров в НС-модели и, как следствие, улучшить ее обобщающие свойства при том же самом объеме обучающего набора. Такой подход (его можно классифицировать как подход типа «серый ящик»), получивший наименование полуэмпирического НС-моделирования, доказал свою эффективность при решении задач моделирования и идентификации для нелинейных управляемых ДС. Однако вычислительная эффективность его в существующем варианте в ряде случаев неудовлетворительна. Для ее повышения в диссертации предлагается расширить существующие методы на случай непрерывного времени,

получены соответствующие результаты, которые иллюстрируются данными вычислительного моделирования.

В **третьей главе** описаны разработанные для полученных во второй главе НС-моделей алгоритмы обучения, которые основываются на методе продолжения решения по параметру. Для этого метода с учетом специфики решаемой задачи предлагается гомотопия функции ошибки, позволяющая варьировать величину горизонта прогноза.

В рамках данного подхода получены два алгоритма, являющиеся вариантами для случая непрерывного времени известных и хорошо зарекомендовавших себя алгоритмов обучения динамических НС-моделей: алгоритма обратного распространения во времени (ВРТТ) и алгоритма рекуррентного обучения в реальном времени (RTRL). Здесь же проведено решение еще одной важной задачи, которая состоит в формировании репрезентативного набора обучающих данных. Решение этой задачи основано на декомпозиции управляющих сигналов на опорный маневр и возмущающее воздействие, что обеспечивает получение эффективного плана экспериментов. Получаемые таким образом обучающие наборы позволяют формировать НС-модели с высокими обобщающими свойствами.

В **четвертой главе** на примере маневренного самолета, для которого имеются соответствующие экспериментальные данные, характеризующие его свойства с высокой степенью достоверности, приводятся результаты большой серии вычислительных экспериментов. В этих экспериментах решались задачи формирования полуэмпирической НС-модели движения рассматриваемого самолета, а также идентификации его аэродинамических характеристик. Наличие экспериментальных данных по моделируемому объекту обеспечило возможность сопоставления с ними получаемых результатов НС-моделирования, с целью оценки эффективности созданных алгоритмов формирования таких моделей. Приведенные результаты вычислительных экспериментов показывают, что обобщающие свойства полученных моделей весьма высоки, задача идентификации аэродинамических характеристик также решается с высокой точностью.

Как следует из представленных в диссертации результатов, использование методов НС-моделирования совместно со знаниями из соответствующей предметной области, являются весьма перспективным инструментом, который может быть эффективно использован для решения сложных прикладных задач управления системами различных видов. В **заключении** рецензируемой диссертационной работы сформулированы основные выводы.

Основные результаты диссертационного исследования М.В. Егорчева **опубликованы** в 21 печатной работе. Среди них 6 статей в журналах, включенных в перечень журналов рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций, а также 7 статей, в изданиях, индексируемых в международных базах данных (6 – Scopus, 1 – Web of Science). Также автором диссертации получено свидетельство о государственной регистрации для набора программ, реализующего алгоритмы, разработанные в диссертации. В процессе выполнения диссертационного исследования его основные результаты **доклаживались и обсуждались** на 14 международных и всероссийских конференциях.

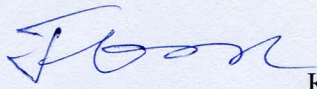
Автореферат соответствует содержанию и выводам диссертации и позволяет получить о них достаточно полное представление. Диссертация оформлена в соответствии с существующими требованиями, написана хорошим литературным языком.

По содержанию диссертационной работы необходимо сделать следующие **замечания**.

1. Показано, что полуэмпирические модели нелинейных управляемых динамических систем существенно превышают по своим обобщающим свойствам традиционные динамические НС-модели типа NARX. В связи со всё возрастающей значимостью сетей глубокого обучения, так же как и NARX, относящихся к моделям типа «черный ящик», следовало бы провести аналогичное сравнение и с динамическими сетями глубокого обучения.
2. Кроме того, целесообразно было бы оценить перспективы перехода к полуэмпирическому моделированию в классе динамических сетей глубокого обучения.

Указанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертации М.В. Егорчева, которая представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Содержание диссертации в достаточной степени отражено в статьях, которые опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также в журналах, индексируемых базами Scopus и Web of Science. Диссертация Егорчева М.В. полностью отвечает требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, Егорчев Михаил Вячеславович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Главный научный сотрудник
НОЦ И.Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
доктор физико-математических наук,
профессор


22.05.2019

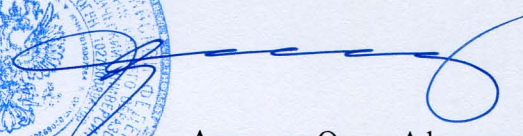
Кузнецов Гений Владимирович

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д.30,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, тел.: 8 (3822) 60-63-33,
tpu@tpu.ru; <http://www.tpu.ru/>
E-mail: marisha@tpu.ru
тел.: 8(3822)60-62-48

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю:

Ученый секретарь Национального
исследовательского Томского
политехнического университета




Ананьева Ольга Афанасьевна