

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 парировать, только если рассматриваемая система обладает свойством адаптивности, то есть имеются средства оперативной подстройки системы и ее модели к меняющейся текущей ситуации. Как показывает имеющийся опыт, аппаратом моделирования, наиболее адекватным указанной ситуации, 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 традиционные НС-модели ДС, в частности модели типа «черный ящик» классов NARX и NARMAX, наиболее часто используемые для НС-моделирования управляемых ДС, в целом ряде случаев не позволяют добиться требуемого уровня точности, обеспечивающего, например, решение задач управления движением летательных аппаратов. Учитывая высокий уровень востребованности математических моделей ДС в задачах как разработки таких систем, так и их эксплуатации, **актуальным** является решение проблемы формирования моделей, обладающих требуемым уровнем точности, а также свойством адаптивности, т.е. способностью поддерживать адекватность модели объекту моделирования, несмотря на изменение свойств данного объекта.

Для решения указанной 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, уже имеющихся для полуэмпирического НС-моделирования ДС, на случай систем с непрерывным временем, что позволяет существенно повысить эффективность данного подхода.

Реализация поставленной цели потребовала решения ряда **задач** исследовательского характера, связанных как с теоретическими вопросами 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 в процессе формирования таких моделей, состоит в получении репрезентативного обучающего набора, для чего потребовалось создать соответствующие алгоритмы планирования эксперимента и формирования такого набора. Больших усилий от диссертанта потребовала также

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № _____
"05 12 2018г.

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, получены **новые научные результаты**. В первую очередь, это распространение полуэмпирического НС-подхода к математическому моделированию управляемых ДС на случай непрерывного времени, что существенно повышает вычислительную эффективность процесса формирования соответствующих моделей. Получен 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 ДС. Он дает возможность значительно уменьшить число настраиваемых параметров в формируемой модели, что, в свою очередь, позволяет существенно снизить требуемый 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 построения таких моделей, а разработанный диссертантом алгоритм планирования экспериментов позволяет обеспечить этот алгоритм представительным обучающим набором. Полученный класс моделей и средств работы с ними может найти широкое применение при решении задач моделирования движения и идентификации характеристик нелинейных многомерных ДС, в том числе и систем с многоканальным управлением. Потенциальные возможности предложенного подхода подтверждаются результатами обширной серии вычислительных экспериментов.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации 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 152 страницы текста, в котором содержится 35 рисунков и 5 таблиц. Список литературы диссертации включает 124 наименования.

Введение посвящено изложению исследуемой проблемы, а также обзору литературы, связанной с этой проблемой. Обосновывается актуальность данной проблемы, формулируется цель работы, после чего выявляются задачи, которые требуется решить для реализации поставленной цели. Дается оценка планируемых результатов, излагаемых в последующих главах, с точки зрения их научной новизны и практической значимости.

В **первой главе** формулируется 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 такой недостаток моделей в виде ОДУ, как отсутствие у них свойства адаптивности, приводит к альтернативному подходу к решению задач моделирования ДС, который основан на использовании аппарата НС-моделирования. Данный альтернативный подход сопоставляется с подходом на основе ОДУ, проводится сравнительный анализ их возможностей. Показано, что использование НС-подхода в его традиционном варианте для моделирования нелинейных управляемых ДС также сопряжено с рядом проблем, которые являются следствием того, что традиционные НС-модели относятся к моделям типа «черный ящик».

Во **второй главе** рассматривается, каким образом можно преодолеть затруднения, характерные для моделей типа «черный ящик» в их нейросетевом исполнении. В качестве основного пути здесь предлагается встраивание в НС-модель фрагментов, отвечающих имеющемуся теоретическому знанию об объекте моделирования, которое 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 его вычислительная эффективность в существующем варианте в ряде случаев неудовлетворительна. Для ее повышения в диссертации предлагается расширить существующие методы на случай непрерывного времени, получены соответствующие теоретические результаты, которые иллюстрируются данными вычислительного моделирования.

Для полученных в предыдущей главе НС-моделей в **третьей главе** разрабатываются 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, а именно, алгоритма обратного распространения во времени (ВРТТ) и алгоритма рекуррентного обучения в реальном времени (RTRL). Здесь же решается еще одна важная задача, которая состоит в формировании представительного набора обучающих данных. Построенное 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 сопоставить с ними получаемые результаты НС-моделирования, чтобы оценить эффективность созданных алгоритмов формирования таких моделей. Приводимые результаты вычислительных экспериментов показывают, что обобщающие свойства полученных моделей весьма высоки, задача идентификации аэродинамических характеристик также решается с высокой точностью.

Как следует из представленных результатов, использование методов НС-моделирования совместно со знаниями из соответствующей предметной области является весьма перспективным инструментом, который может быть эффективно использован для

решения сложных прикладных проблем для управляемых систем различных видов. Данные выводы сформулированы в **заключении** рассматриваемой диссертационной работы.


Основные результаты рассматриваемого диссертационного исследования **опубликованы** в 20 печатных работах. Среди них 7 статей в журналах, включенных в перечень рецензируемых изданий ВАК РФ, а также 7 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных (6 – в МБД Scopus, 1 – в МБД Web of Science). Также 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 12 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 и практически не содержит языковых ошибок.

По содержанию диссертационной работы необходимо сделать следующие **замечания**. В ней 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. 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-исследовательскую и научно-квалификационную работу. Содержание диссертации в достаточной степени отражено в статьях, которые опубликованы в журналах из перечня ВАК РФ, а также в журналах, индексируемых в МБД 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».

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией
адаптивных методов обработки данных
НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова»



04.12.18

Доленко Сергей Анатольевич

119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, НИИЯФ МГУ
Тел. (495) 939-46-19
E-mail: dolenko@sinp.msu.ru

Подпись С.А.Доленко удостоверяю.
Зам.директора НИИЯФ МГУ, профессор



Саврин В.И.