

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»

Одним из важнейших элементов процессов создания и эксплуатации реальных управляемых систем различного назначения, в частности летательных аппаратов, описываемых с точки зрения динамических систем (ДС), является формирование математических и компьютерных моделей этих систем и их элементов как объектов управления. По мере роста сложности создаваемых систем растут и требования к их моделям, а также к средствам, привлекаемым для разработки этих моделей. Типичным для создаваемых перспективных систем является высокий уровень сложности моделируемых объектов и процессов, их многомерность, нелинейность и нестационарность, многообразие и сложность функций, реализуемых моделируемым объектом. В процессе функционирования таких систем их свойства могут существенно изменяться заранее непредсказуемым образом. При этом многие алгоритмы, обеспечивающие такое функционирование, требуют наличия высокоточных и быстродействующих моделей движения рассматриваемой ДС. Если такие модели не учитывают возможных изменений свойств ДС, это ведет к возникновению критических ситуаций. Для предотвращения такого рода ситуаций создаваемые модели, с целью сохранения их адекватности объекту моделирования, должны обладать способностью оперативно подстраиваться под изменившийся объект, т.е. обладать свойствами адаптивности. Успешное решение данной проблемы является важным и **актуальным** для создания и эксплуатации систем и соответствующих им ДС различного назначения.

Поиск эффективных средств решения указанной актуальной проблемы и является **целью** диссертационной работы М.В. Егорчева. Данный поиск базируется на использовании и развитии класса математических и компьютерных моделей, основанных на концепциях искусственной нейронной сети (НС) и полуэмпирической НС-модели, объединяющей возможности теоретического и нейросетевого моделирования.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются такие **задачи**, как:

- 1) распространение полуэмпирического НС-подхода к моделированию нелинейных управляемых систем на случай непрерывного времени;
- 2) разработка алгоритма вычисления оценок значений производных функции ошибки для полуэмпирических НС-моделей в пространстве состояний и непрерывном времени;
- 3) разработка алгоритма обучения полуэмпирических НС-моделей в пространстве состояний и непрерывном времени;
- 4) разработка алгоритма планирования экспериментов для идентификации НС-моделей нелинейных управляемых ДС;
- 5) реализация обширной серии вычислительных экспериментов для отработки создаваемых алгоритмов и оценки их эффективности.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. №

05 06 2019

При решении перечисленных задач диссертантом получен ряд **новых научных результатов**, в том числе:

- 1) полуэмпирический НС-подход к математическому моделированию управляемых ДС распространен на случай непрерывного времени, проведен анализ возможностей получаемых моделей применительно к ДС с сосредоточенными параметрами;
- 2) получены два алгоритма оценки значений градиента и матрицы Гессе функции ошибки для полуэмпирической НС-модели в пространстве состояний и непрерывном времени, представляющие собой непрерывные версии алгоритмов RTRL и BPTT; выполнен анализ асимптотического поведения соответствующих погрешностей;
- 3) разработан 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;
- 4) разработан численный алгоритм планирования экспериментов для идентификации НС-моделей управляющих динамических систем, в котором используется декомпозиция управляющих сигналов на опорный маневр, максимизирующий критерий дифференциальной энтропии, и возмущающее воздействие, которое минимизирует пик-фактор.

**Теоретическая и практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что использование класса полуэмпирических НС-моделей как инструмента анализа и идентификации нелинейных управляемых ДС обеспечивает возможность существенно снизить количество настраиваемых параметров в формируемой модели и, как следствие, значительно снизить требуемый объем обучающего набора данных. За счет этого полуэмпирический НС-подход к моделированию ДС улучшает обобщающие свойства получаемых моделей. Диссертантом осуществлено развитие данного подхода за счет рассмотрения моделей в непрерывном времени, что значительно повышает их гибкость за счет появляющейся возможности применения к моделям различных численных методов интегрирования вместо единственного фиксированного метода в полуэмпирических НС-моделях с дискретным временем. Полученный алгоритм обучения НС-моделей, основанный на методе продолжения решения по параметру, повышает эффективность процесса обучения таких моделей, а разработанный диссертантом алгоритм планирования экспериментов позволяет обеспечить этот алгоритм информативным обучающим набором. Полученный класс моделей и средств работы с ними может быть применен для решения задач моделирования движения и идентификации характеристик нелинейных многомерных систем с многоканальным управлением, что подтверждено результатами обширной серии вычислительных экспериментов.

**Достоверность** полученных в диссертации результатов обеспечивается корректным применением соответствующего математического аппарата, 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, общим объемом в 155 страниц текста с 35 рисунками и 5 таблицами. В списке литературы диссертации приведено 132 наименования.

Во **введении** дается обзор литературы, относящейся к кругу исследуемых проблем, обосновывается их актуальность. Здесь же формулируется цель работы, выявляются задачи, требующие решения для достижения поставленной цели. Показано также, какие из планируемых результатов обладают научной новизной, а также в чем состоит их практическая значимость.

В **первой главе** дается постановка задачи математического моделирования применительно к детерминированным управляемым ДС с сосредоточенными параметрами. Анализируется традиционный вариант математических моделей для рассматриваемого класса ДС, а именно, обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ), выявляются их достоинства и недостатки при решении задач моделирования и идентификации ДС. Затем рассматривается альтернативный подход к решению этих задач, основанный на технологии НС-моделирования. Анализируются возможности данного подхода, сопоставляются с возможностями подхода на основе ОДУ. Дается описание и анализ проблем, возникающих при использовании НС-подхода для моделирования нелинейных управляемых ДС.

Во **второй главе** рассматриваются способы преодоления затруднений, порождаемых традиционными НС-моделями ДС. В качестве основного варианта предлагается использовать полуэмпирический подход к НС-моделированию ДС, который позволяет формировать требуемую модель не только на основе экспериментальных данных о поведении моделируемой ДС, но и с привлечением теоретических знаний, имеющихся для рассматриваемой системы. Такой подход позволяет значительно уменьшить число настраиваемых параметров в НС-модели и улучшить ее обобщающие свойства. В данной главе дается процедура формирования полуэмпирической НС-модели, расширяющая данный класс моделей на случай непрерывного времени, получены соответствующие теоретические результаты, которые иллюстрируются данными вычислительного моделирования.

В **третьей главе** вводятся алгоритмы обучения для НС-моделей, полученных в главе 2. Эти алгоритмы основываются на методе продолжения решения по параметру, для которого предлагается гомотопия функции ошибки, позволяющая варьировать величину горизонта прогноза. Для случая непрерывного времени формируются варианты двух известных алгоритмов обучения динамических НС-моделей, а именно, алгоритма обратного распространения во времени (ВРТТ) и алгоритма рекуррентного обучения в реальном времени (RTRL). В этой же главе рассматривается решение еще одной важной задачи, а именно, задачи формирования репрезентативного набора обучающих данных. Это решение основано на декомпозиции управляющих сигналов на две составляющие (опорный маневр и возмущающее воздействие), что позволяет получить эффективный план экспериментов.

В **четвертой главе** даются результаты обширной серии вычислительных экспериментов, проводившейся в процессе диссертационного исследования. В качестве объекта моделирования и идентификации характеристик использовался маневренный самолет, для которого имеются соответствующие экспериментальные данные, характеризующие его свойства с высокой степенью достоверности. Наличие этих данных позволило сопоставить их с получаемыми результатами НС-моделирования и тем самым оценить эффективность созданных алгоритмов формирования таких моделей. Результаты

вычислительных экспериментов убедительно свидетельствуют о хороших обобщающих свойствах полученных моделей.

В **заключении** диссертационной работы отмечается, что, как следует из полученных результатов, методы НС-моделирования в сочетании со знаниями и опытом из соответствующей предметной области, являются мощным и перспективным инструментом, потенциально пригодным для решения сложных прикладных проблем для реальных управляемых систем различных классов.

Основные результаты, выносимые на защиту, **опубликованы** в 21 печатной работе, среди которых 6 статей в журналах из перечня ведущих рецензируемых изданий ВАК РФ, 6 статей в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus, 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе данных Web of Science, получено также свидетельство о государственной регистрации программного комплекса, реализующего разработанные в диссертации алгоритмы. Основные результаты работы **доклаживались и обсуждались** на 14 международных и всероссийских конференциях.

**Автореферат** в целом отражает содержание диссертации.

**Замечания** по содержанию диссертационной работы:

1. Предметом изучения в диссертации являются управляемые ДС с сосредоточенными параметрами, традиционными моделями для которых являются системы ОДУ. Однако среди прикладных систем важное место занимают также системы с распределенными параметрами, описываемые уравнениями в частных производных. Хотелось бы в перспективе видеть развитие предлагаемого диссертантом аппарата и на случай систем с распределенными параметрами.
2. В качестве НС-архитектуры традиционного типа (т.е. типа «черный ящик») в диссертации рассматривается сети NARX, т.е. нелинейная авторегрессия с внешними входами. Эта сеть не учитывает внешних воздействий случайного характера на моделируемый объект, тогда как такие воздействия могут играть существенную роль. По этой причине представляется, что было бы целесообразно для сравнения полуэмпирических НС-моделей привлекать не только сети типа NARX, но и сети другого типа, например, NARMAX, учитывающие указанные воздействия.
3. В обзоре научной литературы по теме диссертации и списке литературы указаны ссылки на некоторые работы А.Н. Васильева и Д.А. Тархова, посвященные вопросам, обсуждаемым в диссертационной работе, таким, как нейросетевое моделирование реальных объектов по разнородной обновляемой информации, полуэмпирические нейросетевые модели, многослойные функциональные системы и др. Однако анализ, проведенный диссертантом, недостаточно глубок. Хотелось бы привлечь его внимание к возможностям многослойных функциональных систем в построении нейросетевых моделей, в решении некорректных задач.

Указанные замечания скорее являются рекомендацией для будущих исследований, они не снижают научной и практической ценности диссертации, которая представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Содержание диссертации в полной мере изложено в статьях, опубликованных в журналах из перечня ВАК РФ, а также в журналах, индексируемых в международных

базах данных Scopus и Web of Science. Диссертация Егорчева М.В. в полной мере отвечает требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Считаю, что автор диссертации, Егорчев Михаил Вячеславович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,  
профессор кафедры  
высшей математики  
Санкт-Петербургского  
политехнического университета  
Петра Великого,  
доктор технических наук



Васильев Александр Николаевич

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая, 29  
Тел.: (812) 552 67 50  
E-mail: a.n.vasilyev@gmail.com

Подпись Васильева Александра Николаевича удостоверяю

