

«Утверждаю»  
Директор ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

Власов С.Е.

«15» мая 2019 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Егорчева Михаила Вячеславовича «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».

Свойства управляемых динамических систем, в частности, объектов авиационной техники, в процессе их функционирования могут изменяться заранее непредсказуемым образом, например, вследствие различного рода отказов и повреждений. Если математические и компьютерные модели таких объектов, используемые в составе их бортового оборудования, не учитывают указанных изменений, это ведет к возникновению критических ситуаций. Один из путей решения данной проблемы состоит в формировании моделей, которые могут оперативно, непосредственно в процессе функционирования объекта, подстраиваться к его изменившимся свойствам, т.е. моделей, обладающих адаптивностью. Успешное решение этой проблемы является весьма значимым как с точки зрения теории управляемых динамических систем, так и исходя из потребностей практического решения разнообразных прикладных задач. Данное обстоятельство обуславливает **актуальность** диссертационной работы М.В. Егорчева.

Дифференциальные уравнения, традиционно применяемые при решении задач анализа и синтеза управляемых динамических систем, не позволяют решить проблему адаптивности моделей таких систем. Требованию адаптивности формируемой модели объекта позволяет удовлетворить подход, основанный на использовании методов машинного, в частности, нейросетевого, обучения. Данный подход, однако при моделировании управляемых динамических систем обладает существенным недостатком. Этот недостаток заключается в том, что традиционные нейросетевые модели относятся к классу «черный ящик», что существенно ограничивает уровень сложности управляемых динамических систем, которые могут быть промоделированы. Альтернативный подход связан с получением моделей типа «серый ящик» (полуэмпирических нейросетевых моделей). Он основан на использовании при формировании моделей не только данных о поведении объекта, как это имеет место в моделях типа «черный ящик», но и на привлечении имеющихся теоретических знаний о моделируемом объекте, например, в форме дифференциальных уравнений, описывающих его движение. Для успешного применения данного подхода к задачам анализа, синтеза и идентификации нелинейных управляемых динамических систем потребовалось проведение ряда дополнительных исследований, развивающих сам подход. Такое развитие, представляющее собой **основную цель** диссертационной работы М.В. Егорчева, заключается в распространении тех результатов, которые были получены ранее для полуэмпирических нейросетевых моделей, на случай систем с непрерывным временем. Такого рода развитие существующих методов обеспечивает значительное повышение вычислительной эффективности методов полуэмпирического моделирования.

Чтобы добиться реализации поставленной цели, диссертанту потребовалось решить **совокупность задач** исследовательского характера. Проведенные исследования касаются

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. №

05-06 2019

теоретических вопросов, возникающих при попытке распространить результаты, уже существующие для полуэмпирических нейросетевых моделей управляемых динамических систем, на случай моделирования в пространстве состояний в непрерывном времени. Кроме того, потребовалось получить ряд результатов, связанных с обучающими алгоритмами, учитывающими специфику формируемых моделей. Наконец, пришлось решать нетривиальную проблему, связанную с обеспечением этих алгоритмов репрезентативным обучающим набором. Значительных усилий потребовала также реализация большого объема вычислительных экспериментов, требуемых как для отработки предлагаемых алгоритмов, так и для оценки их эффективности.

Решение указанной совокупности задач позволило получить ряд **новых научных результатов**, в том числе: 1) полуэмпирический нейросетевой подход к математическому моделированию управляемых динамических систем распространен на случай непрерывного времени, сформулированы и доказаны теоремы об аппроксимационных свойствах таких моделей; 2) получены два алгоритма оценки значений градиента и матрицы Гессе функции ошибки для полуэмпирической нейросетевой модели в пространстве состояний и непрерывном времени, представляющие собой непрерывные версии алгоритмов RTRL и BPTT, используемых для обучения динамических сетей, сформулирована и доказана теорема для оценки сверху величины соответствующей погрешности в зависимости от величины шагов по времени; 3) разработан численный алгоритм обучения полуэмпирической нейросетевой 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 нейросетевых моделей управляющих динамических систем, использующий декомпозицию управляющих сигналов на опорный маневр (с максимизацией дифференциальной энтропии) и возмущающее воздействие (с минимизацией пик-фактора).

**Теоретическая и практическая значимость** диссертационной работы в том, что в ней осуществлено развитие класса полуэмпирических нейросетевых моделей управляемых динамических систем, позволившее получить эффективный инструмент для решения задач анализа поведения и идентификации характеристик таких систем. Повышение эффективности в данном случае обусловлено тем, что оказалось возможным значительное снижение числа настраиваемых параметров в формируемой модели. Это, в свою очередь, ведет к улучшению обобщающих свойств модели, а также к снижению требований к объему обучающего набора. Предложенное диссертантом развитие полуэмпирического подхода к моделированию управляемых динамических систем путем перехода к рассмотрению их в непрерывном времени существенно повышает гибкость моделей за счет возможности варьировать методы численного интегрирования дифференциальных уравнений, привлекаемые в качестве одного из элементов синтеза полуэмпирической модели. Следует отметить также полученный в диссертации алгоритм обучения для таких моделей, основанный на методе продолжения решения по параметру и обеспечивающий высокую эффективность процессов обучения таких моделей. Еще один важный элемент обеспечения такой эффективности состоит в разработанном диссертантом алгоритме планирования экспериментов, дающем возможность получить информативный обучающий набор, учитывающий специфику поведения моделируемой системы в различных условиях и при различных управляющих воздействиях. В итоге, класс математических моделей управляемых динамических систем, а также средств формирования таких моделей может найти широкое применение при решении разнообразных прикладных проблем, которые сводятся к задачам анализа и идентификации для управляемых динамических систем. Возможности предложенного в диссертации подхода подтверждаются результатами многочисленных вычислительных

экспериментов, а также сопоставлением этих результатов с имеющимися экспериментальными данными.

**Достоверность и обоснованность** полученных в диссертации теоретических результатов обеспечивается корректным применением математического аппарата, использованного для получения этих результатов. Оценку обоснованности и работоспособности разработанных численных алгоритмов дают результаты проведенных вычислительных экспериментов, а также сопоставление этих результатов с имеющимися экспериментальными данными.

**Общая характеристика диссертации.** Диссертация изложена на 155 страницах с 35 рисунками и 5 таблицами, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 132 наименований.

Во **введении** формулируется исследуемая проблема, обосновывается ее актуальность, дается обзор литературы, относящейся к ней. Здесь также дается формулировка цели диссертационного исследования, и перечисляются задачи, которые требуется решить. Кроме того, дается оценка научной новизны и практической значимости планируемых результатов.

В **первой главе** рассматривается постановка задачи математического моделирования для случая детерминированной управляемой динамической системы с сосредоточенными параметрами. В традиционном варианте такие системы описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями. Дается анализ этого класса моделей с точки зрения задач анализа поведения и идентификации характеристик систем рассматриваемого вида. Выявляется такой их недостаток, значимый для практики, как отсутствие адаптивности как возможности оперативной корректировки модели при изменении свойств моделируемого объекта. В качестве альтернативы, обеспечивающей адаптивность моделей, рассматривается нейросетевое моделирование в его традиционном варианте, который приводит к получению моделей типа «черный ящик». Дается описание и анализ проблем, возникающих при попытках использовать модели данного вида применительно к нелинейным управляемым динамическим системам.

Во **второй главе** предлагаются способы преодоления проблем, связанные с использованием динамических нейросетевых моделей традиционного вида. Как основной вариант рассматривается привлечение теоретических знаний об объекте моделирования, не используемых при традиционном нейросетевом подходе, к формированию искомой модели. Этот подход приводит к моделям типа «серый ящик», процесс формирования которых основан на привлечении как экспериментальных данных о поведении объекта, так и теоретических знаний о нем. Такой подход подтверждает свою эффективность при моделировании нелинейных управляемых динамических систем, однако его вычислительную эффективность в ряде случаев нельзя признать удовлетворительной. Решение проблемы повышения эффективности полумпирического нейросетевого подхода в диссертации предлагается осуществить путем распространения существующих результатов на случай непрерывного времени. Для этого получены теоретические результаты, иллюстрируемые данными вычислительного эксперимента.

В **третьей главе** для нейросетевых полумпирических моделей, введенных в главе 2, разрабатываются соответствующие обучающие алгоритмы. Эти алгоритмы основаны на методе продолжения решения по параметру. С учетом специфики решаемой задачи, для данного метода предложена гомотопия функции ошибки, которая позволяет варьировать величину горизонта прогноза. Здесь же предложены два алгоритма, распространяющие на

случай непрерывного времени известные алгоритмы обучения динамических нейронных сетей, а именно, алгоритма обратного распространения во времени (BPTT) и алгоритма рекуррентного обучения в реальном времени (RTRL). Еще одна важная проблема, возникающая при обучении нейросетевых моделей, состоит в обеспечении их репрезентативным набором обучающих данных. Для решения этой проблемы предлагается использовать метод декомпозиции управляющих сигналов с разделением их на опорный маневр и возмущающее воздействие, что обеспечивает возможность получать полуэмпирические модели с высокими обобщающими свойствами.

В **четвертой главе** приведены результаты вычислительного моделирования, которое осуществлялось в большой серии экспериментов. В качестве примера нелинейной управляемой динамической системы был взят маневренный самолет, представляющий собой весьма сложный объект вследствие его многомерности, обширной области возможных режимов функционирования, существенной нелинейности его аэродинамических характеристик, а также необходимости многоканального управления им при получении исходных данных для задач анализа движения и идентификации его аэродинамических характеристик. Для этого самолета имеются соответствующие экспериментальные данные, позволяющие путем сопоставления с ними результатов полуэмпирического моделирования оценивать работоспособность предлагаемого подхода. Решаются две основные задачи: формирование нескольких вариантов полуэмпирической нейросетевой модели движения рассматриваемого самолета, а также идентификация его аэродинамических характеристик. Полученные численные результаты позволяют говорить о высоких обобщающих свойствах сформированных моделей. Задача идентификации аэродинамических характеристик рассматриваемого самолета также решается с высокой точностью для всей области допустимых значений величин, характеризующих объект моделирования.

В **заключении** диссертационной работы отмечается, что согласно полученным результатам, методы полуэмпирического нейросетевого моделирования, сочетающие знания из соответствующей предметной области с экспериментальными данными о поведении моделируемого объекта, являются инструментом, потенциально пригодным для решения сложных прикладных проблем для управляемых систем различных видов.

**Рекомендации по использованию результатов диссертации.** Результаты диссертационной работы М.В. Егорчева могут быть с успехом использованы для решения разнообразных практических задач, связанных с моделированием поведения и идентификацией характеристик нелинейных управляемых динамических систем, для которых характерно наличие обширной области возможных значений величин, характеризующих состояния и управления рассматриваемой системы.

Результаты диссертационной работы **опубликованы** должным образом. Диссертант является автором 21 публикации, в числе которых 6 статей в журналах из перечня ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК РФ, еще 7 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. Получено также **свидетельство** о государственной регистрации программного комплекса, в котором реализованы алгоритмы, предложенные в диссертации. Основные результаты диссертации, выносимые на защиту, в этих публикациях отражены полностью, кроме того, они были **доложены** на 14 международных и всероссийских конференциях. **Автореферат** соответствует содержанию диссертации и позволяет получить о ней достаточно полное представление.

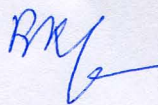
Ознакомление с текстом диссертации М.В. Егорчева вызывает следующие **замечания** по ее содержанию. При решении задач моделирования для реальных динамических систем большое значение имеет возможность учета возмущающих воздействий случайного характера на их поведение. В диссертации такой учет осуществлен только для случайных воздействий на результаты измерений состояний системы (измерительных шумов), в то время как такие воздействия на моделируемую систему обычно происходят и в процессе ее функционирования (например, воздействие атмосферной турбулентности на летательный аппарат в задаче моделирования его полета). Аналогично обстоит дело и с задачей идентификации характеристик исследуемой системы, результаты решения которой также подвержены воздействию случайных факторов, которые имели место при получении исходных данных для данной задачи. Было бы целесообразно при формировании полуэмпирической нейросетевой модели учитывать и факторы такого вида как это, например, делается в сетях типа NARMAX.

Данные замечания не снижают общего положительного впечатления о диссертации Егорчева М.В., которая представляет собой законченную научно-квалификационную работу и содержит развитие методов полуэмпирического нейросетевого моделирования нелинейных управляемых динамических систем на случай непрерывного времени. Предложенные автором методы имеют значение для решения актуальных и значимых для практики задач математического и компьютерного моделирования и идентификации характеристик нелинейных управляемых динамических систем различных видов, в частности, летательных аппаратов.

Представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 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».

Отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре ЦОНТ ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН 13.05.2019 г. (протокол № 5).

Руководитель Центра  
оптико-нейронных технологий  
(ЦОНТ ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)  
д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН



Крыжановский Б.В.

117218, Москва, Нахимовский проспект, 36, к.1, ЦОНТ ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН  
Телефоны: +7 (499) 124-48-64, +7 (495) 718-21-10  
E-mail: niisi@niisi.msk.ru  
Веб-сайт: <https://www.niisi.ru/iont/>