

**ОТЗЫВ**  
**ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
НА ДИССЕРТАЦИЮ ТЮМЕНЦЕВА ЮРИЯ ВЛАДИМИРОВИЧА НА ТЕМУ  
«НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»,  
ПРЕДСТАВЛЕННУЮ К ЗАЩИТЕ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК  
ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 05.13.01  
«СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ  
(АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА)»

Неотъемлемыми элементами процессов создания и эксплуатации технических систем различных видов являются математические модели этих систем и их элементов. Автор придерживается точки зрения, при которой понятие динамическая система (ДС) практически отождествляется с самим моделируемым реальным сложным физико-техническим объектом или процессом, – далее возникают модели ДС. С ростом сложности систем, а также реализуемых ими функций и решаемых задач, возрастает также и уровень требований, предъявляемых к соответствующим математическим моделям. Традиционный аппарат математического и компьютерного моделирования не во всех случаях в состоянии удовлетворить этим требованиям. В частности, аппарат адаптивного и интеллектуального управления, который находит все более широкое применение для решения проблемы роботизации технических систем, в частности, беспилотных летательных аппаратов, требует наличия моделей, обладающих свойством адаптивности, т.е. таких, которые могут приспосабливаться к непредсказуемым изменениям как в свойствах системы, так и в условиях ее функционирования. Проблема адаптивности модели ДС критически важна для систем адаптивного и интеллектуального управления, что обуславливает **актуальность** исследований, проведенных в рамках рассматриваемой диссертационной работы.

Традиционно в качестве моделей сосредоточенных ДС используются обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) или дифференциально-алгебраические уравнения (ДАУ), но, несомненно, интерес представляют решения этих уравнений, которые по сути дела и являются собой модели (как правило, приближенные) ДС. ОДУ/ДАУ совместно с соответствующими методами их интегрирования – основа для решения трех основных задач, связанных с ДС: анализ поведения ДС, синтез управления для ДС, идентификация ДС. Модели данного вида обладают высокой точностью, однако они не удовлетворяют условию адаптивности. В то же время, свойством адаптивности обладают нейросетевые (НС) модели, однако применительно к задачам моделирования динамических систем такие НС-модели обладают ограниченными возможностями по уровню сложности рассматриваемых ДС. Данное ограничение является следствием принятой в НС-моделях *традиционного* типа трактовки системы как «черного ящика», полученного с использованием экспериментальных данных о поведении ДС (следует отметить, что в современных методах построения НС-моделей традиционный подход уступает позиции параметрическим НС-моделям на основе гетерогенных данных).

В связи с ограничениями, присущими традиционным математическим моделям ДС, как в виде дифференциальных уравнений, так и в виде нейронных сетей, в качестве **цели** диссертационной работы было принято получение класса гибридных математических моделей, объединяющего достоинства упомянутых традиционных моделей и свободного от их недостатков. При этом **объектом исследования** являются управляемые ДС, действующие в условиях разнообразных неопределенностей, включая неполное и неточное знание о ДС и условиях, в которых ДС действует, неопределенности, порождаемые изменением свойств ДС, а также неопределенности, порождаемые неконтролируемыми возмущениями, действующими на ДС. Тогда **предметом исследования** являются модели многомерных нелинейных управляемых ДС, обладающие свойством адаптивности, характеризующиеся высокой точностью и быстроедействием, а также адаптивные законы управления движением ДС.

**Общая характеристика работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы из 211 наименований, а также двух приложений. Она изложена на 466 страницах, включая 288 страниц основного текста и 178 страниц приложений, содержит 276 рисунков и 10 таблиц.

Во *введении* содержится обоснование потребности в новом подходе к математическому и компьютерному моделированию управляемых ДС, в частности таких, которые обладают свойством адаптивности. В свою очередь, необходимость наделения ДС свойством адаптивности вытекает из того, что для сложных технических систем, например, из области авиационной и ракетно-космической техники, решение проблем моделирования существенно осложняется неполным и неточным знанием свойств моделируемой ДС, а также условий, в которых система будет действовать. Еще одним существенным фактором неопределенности являются возможные непредсказуемые изменения свойств ДС вследствие, например, повреждений конструкции системы или отказов оборудования. Механизм адаптивности, которым наделяется ДС, должен обеспечить компенсацию воздействия упомянутых факторов неопределенности. В работе показано, что в реализации механизма адаптивности критически важная роль принадлежит модели ДС. При этом если свойства ДС по каким-либо причинам изменились, первоначально построенная ее модель перестает соответствовать объекту моделирования, и возникает проблема оперативного восстановления адекватности модели этому объекту, т.е. модель ДС должна обладать адаптивностью. Реализация адаптивного моделирования порождает комплекс проблем, для решения которых обосновывается необходимость привлечения нейросетевых (НС) технологий.

В *первой главе* формулируется проблема моделирования управляемого движения ДС, а также выявляются задачи, требующие решения. С этой целью вначале с позиций общей теории систем формируется типология ДС, т.е. классификация систем по их существенным признакам; выявляются также варианты среды, с которой взаимодействуют ДС, что обеспечивает единый контекст для решения задач анализа поведения, синтеза управления и идентификации таких систем. Вводятся понятия поведения и деятельности систем, с использованием которых формулируется общий подход к решению проблемы моделирования ДС, а также выявляются основные задачи, требующие решения при формировании модели ДС. Здесь же обсуждается проблема адаптивности систем, а также выявляется роль моделей с точки зрения решения данной проблемы.

Во *второй главе* рассматривается нейросетевой подход к задачам моделирования систем и управления ими. Предлагается порождающий подход к формированию НС-моделей, основанный на трактовке нейронной сети как разложения по некоторому обобщенному многоуровневому настраиваемому функциональному базису. Дается представление таких разложений, выявляется специфика, присущая нейронным сетям и отличающая их от функциональных сетей. Выявляются три основных элемента процесса синтеза НС-моделей: построение такого *семейства моделей*, которое будет содержать искомую модель; получение *набора обучающих данных*, обладающего требуемой информативностью; построение *алгоритмов выделения искомой модели* из сформированного ранее семейства. Для решения первой из этих трех задач (семейство моделей) формируется соответствующая структурная организация НС-моделей, основанная на введении набора параметризованных примитивов и правил их комбинирования в иерархические структуры для получения требуемой модели под заданные требования к ней. Вторая задача (обучающие данные) решается с использованием непрямого подхода, основанного на специальном выборе тестовых воздействий на ДС. Дается сопоставление непрямого подхода с прямым: показано, что для задач, типичных для рассматриваемой предметной области, прямой подход не может быть применен. Третья задача (формирование конкретной модели) приводит к необходимости решения ряда проблем, типичных для динамических НС-моделей, намечаются пути решения этих проблем, в частности, предложен алгоритм сведения решения исходной задачи обучения НС-модели к последовательности подзадач, сходящейся к решению исходной задачи.

В третьей главе на основе результатов, полученных в первых двух главах, рассматривается задача НС-моделирования управляемого движения летательных аппаратов (ЛА) с использованием нейросетевого подхода традиционного типа, согласно которому моделируемая ДС трактуется как объект типа «черный ящик», т.е. как чисто эмпирическая модель, основанная только на имеющихся экспериментальных данных о поведении изучаемой ДС. Для НС-моделирования движения ЛА используется модель типа NARX, представляющая собой нелинейную авторегрессию с внешними входами, в качестве которых выступают управляющие воздействия на ЛА. Данная модель, достаточно востребованная в задачах рассматриваемого вида, реализуется как рекуррентная слоистая нейронная сеть с элементами задержки на входах и обратными связями между слоями. Проведена оценка работоспособности данной модели на примере задачи моделирования продольного углового движения ЛА, которая показала весьма ограниченный потенциал НС-моделей данного класса в задачах моделирования движения ЛА. Пути преодоления выявленных затруднений рассматриваются в пятой и шестой главах диссертации.

В четвертой главе результаты трех предшествующих глав используются для реализации концепции адаптивности ДС, рассматриваемой применительно к задаче адаптивного управления полетом ЛА. В числе схем адаптивного управления (АУ), используемых для решения данной задачи, используются АУ с эталонной моделью, АУ с прогнозирующей моделью, АУ с обратной динамикой и АУ с инверсной моделью. Для этих схем АУ проведена обширная серия вычислительных экспериментов, результаты которых представлены в приложении А. Эти результаты показывают большой потенциал АУ применительно к компенсации разнообразных неопределенностей, включая и неопределенности, порождающие изменение свойств ДС. Вместе с тем, выявлен порог сложности для решаемых задач, существенно ограничивающий возможности динамических НС-моделей традиционного типа («черный ящик») при решении типичных для авиационной и ракетно-космической техники задач моделирования движения и синтеза управления.

В пятой главе предлагается подход, позволяющий справиться с трудностями, выявленными в двух предыдущих главах. А именно, вводится понятие *полуэмпирической НС-модели*, позволяющее преодолеть порог сложности, обнаруженный при рассмотрении эмпирических НС-моделей. Полуэмпирическая НС-модель является моделью гибридного типа (модель типа «серый ящик»), формируемой с привлечением как *экспериментальных данных* о поведении ДС (как это имеет место в традиционных НС-моделях), так и *теоретического знания* о моделируемой ДС (в форме ОДУ движения объекта, задающих ДС). Предлагается схема процесса формирования полуэмпирической НС-модели, а также алгоритмическая реализация элементов данного процесса. Функционирование этой схемы в целом (а также ее элементов) показано на специально подобранном демонстрационном примере, дано также сопоставление полученных результатов с результатами, получаемыми для этой же задачи с привлечением эмпирической НС-модели класса NARX. Показано неоспоримое преимущество полуэмпирической НС-модели по сравнению с эмпирической, причем с ростом сложности решаемой задачи это преимущество увеличивается.

В шестой главе оценивается эффективность разработанного в предыдущей главе аппарата полуэмпирического НС-моделирования для решения прикладных задач, связанных с моделированием движения ЛА. С этой целью решаются задачи моделирования продольного углового движения и полного углового движения для маневренного самолета. Для продольного углового движения задача моделирования рассматривалась ранее, в главе 4, с привлечением аппарата традиционного НС-моделирования. Именно эта задача была выявлена как пороговая по достижимому уровню сложности в рассматриваемой предметной области. Показано, что полуэмпирический подход позволяет эффективно преодолевать данный порог, позволяя многократно повысить точность моделирования движения ЛА. Затем рассматривается существенно более сложная задача моделирования полного углового движения ЛА (14 ОДУ против 4 ОДУ в исходной теоретической модели предыдущей задачи). Эта задача также успешно решается – демонстрируется высокий потенциал полуэмпирического подхода к НС-

моделированию нелинейных управляемых ДС. Как часть задачи полуэмпирического моделирования успешно решается также задача идентификации характеристик моделируемой ДС (безразмерные коэффициенты аэродинамических сил и моментов ЛА в рассматриваемом случае). При этом зависимости для искомых коэффициентов отыскиваются как нелинейные функции многих переменных (состояния и управления ЛА) в отличие от традиционного подхода к идентификации аэродинамических характеристик ЛА, основанного на линеаризации этих зависимостей. Это традиционное представление может быть получено, при необходимости, из соотношений, предоставляемых полуэмпирическим подходом.

*В заключении* диссертационной работы отмечается, что полуэмпирический подход к формированию НС-моделей управляемых динамических систем позволяет успешно решать задачи формирования адаптивных ДС, а также задачи идентификации характеристик таких систем. Он открывает возможность эффективно решать разнообразные прикладные задачи синтеза и анализа адаптивных и интеллектуальных систем управления движением ЛА различных классов (а также ДС других видов).

*В приложении А* приводятся результаты обширной совокупности вычислительных экспериментов, которые выполнялись для оценки работоспособности и демонстрации возможностей разрабатываемых моделей и методов.

*В приложении Б* приводится серия диаграмм информативности для обучающих наборов, формируемых с помощью различных тестовых воздействий (тестовый маневр + тестовое возбуждающее воздействие) на ДС. Эти результаты позволяют наглядно показать, в какой степени зависят от вида тестового воздействия информативность получаемого обучающего набора и, как следствие, возможность успешно решить задачу формирования НС-модели.

В процессе выполнения диссертационной работы был получен целый ряд **новых научных результатов**, которые можно подразделить на следующие три категории: 1) результаты в области НС-технологий, представляющих собой эффективный инструмент для работы с нелинейными ДС – введено понятие порождающей математической модели для НС, унифицирующее представление как статических, так и динамических НС, что открывает путь к автоматизации процесса синтеза НС-моделей под заданные требования к ним; 2) результаты в области математического моделирования ДС – введен класс гибридных адаптивных НС-моделей для ДС, позволяющий эффективно использовать для формирования таких моделей как данные о поведении ДС, так и теоретические знания о ней, разработан соответствующий комплекс алгоритмов для синтеза таких моделей; 3) результаты в области идентификации характеристик ДС (в частности, аэродинамических характеристик ЛА) – реализованный подход не требует привлечения линеаризации соотношений для искомым характеристик, как это имеет место в традиционных подходах, а дает возможность получить эти характеристики как нелинейные функции нескольких переменных, определенные во всей области режимов функционирования ДС.

**Научная значимость** диссертационной работы Ю.В. Тюменцева состоит в том, что предложенный в ней подход к решению крупной научной проблемы – моделирование адаптивных ДС – открывает новые возможности для решения задач анализа поведения, синтеза управления и идентификации ДС (включая их роботизированные варианты) в условиях неопределенности.

**Практическая ценность** работы в том, что ее результаты ориентированы на использование разработчиками перспективных ДС, в первую очередь – летательных аппаратов различных классов, при формировании алгоритмов адаптивного и интеллектуального управления их поведением.

**Достоверность** научных результатов, полученных в диссертации, обеспечивается адекватным использованием методов системного анализа, математического и компьютерного моделирования, вычислительной математики и нейросетевого моделирования. Она подтверждается данными обширного набора вычислительных экспериментов, реализованных в ходе выполнения работы, а также сопоставлением данных вычислительных экспериментов с имеющимися данными физических экспериментов.

По результатам диссертационной работы **опубликовано** 86 печатных работ, среди которых монография, 23 статьи в журналах из перечня ведущих рецензируемых изданий ВАК РФ, 9 статей в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 42 статьи в источниках, индексируемых в РИНЦ. Имеются акты внедрения и свидетельства о государственной регистрации программных комплексов на ЭВМ. Основные результаты диссертационной работы **обсуждались** на 40 международных, всероссийских и отраслевых конференциях и семинарах.

У работы хороший стиль. **Автореферат** полностью отражает содержание диссертации.

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

1. Рассмотрение НС-моделей традиционного типа проводится, в основном, на примере моделей типа NARX (нелинейная авторегрессия с внешним входом) и не дается их сопоставление с моделями типа NARMAX, учитывающими неконтролируемые внешние возмущающие воздействия уже на этапе синтеза модели ДС.

2. В качестве динамической НС-модели традиционного вида (типа «черный ящик») рассматривается сеть типа NARX и, в меньшей степени, NARMAX. Отсутствует сопоставление с рекуррентными НС-моделями ДС других видов.

3. При преобразовании исходной теоретической модели в виде системы ОДУ в НС-структуру отсутствует анализ влияния вида разностной схемы, отвечающей тому или иному методу приближенного интегрирования ОДУ, на свойства (точность, устойчивость) получаемой НС-модели.

4. Отсутствует обзор и анализ доступной литературы по теме диссертации, а встречающиеся иногда комментарии не всегда сделаны корректно: например, п.3.1 стр.144 (о моделях типа «черный ящик»). Список литературы предпочтительней упорядочить по алфавиту.

Указанные замечания не влияют на общий **высокий научный уровень** диссертационной работы Тюменцева Ю.В., не снижают научной значимости и практической ценности полученных результатов. Часть замечаний носит характер пожеланий на будущее. Сформулированные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертация Юрия Владимировича Тюменцева представляет собой самостоятельную завершённую научно-исследовательскую работу, в которой решена крупная научная проблема, имеющая важное теоретическое и практическое значение в области анализа движения, синтеза управления и идентификации характеристик адаптивных динамических систем различных классов. Работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)», а её автор Тюменцев Ю.В. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ,  
ПРОФЕССОР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ПЕТРА ВЕЛИКОГО,  
ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК



ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая, 29  
Тел.: 8 (921) 878-51-66  
E-MAIL: [A.N.VASILYEV@GMAIL.COM](mailto:A.N.VASILYEV@GMAIL.COM)

СПб., 21.11.2016

Подпись *Васильева А.Н.*  
УДОСТОВЕРЯЮ  
Ведущий специалист  
по кадрам. *Шинкарева М.А.*  
«21» 11 2016 г.