

## 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)».

**Актуальность** избранной темы обусловлена все возрастающей сложностью динамических систем (ДС) и систем управления, в особенности используемых в авиации. При создании перспективных технических систем традиционный аппарат математического моделирования, основанный на решении дифференциальных уравнений, не всегда позволяет решать возникающие задачи. Подобного рода ситуации возникают, когда моделируемый объект, например, летательный аппарат (ЛА), вследствие отказов и повреждений внезапно и существенно изменяет свои характеристики, а модель используется в составе бортового комплекса средств управления поведением ДС. В такой ситуации, когда встроенная в систему управления модель перестает соответствовать моделируемому объекту, необходимо скорректировать модель для восстановления ее соответствия этому объекту. Следовательно, модель объекта должна обладать свойством адаптивности, которым математические модели в виде систем дифференциальных уравнений этим свойством не обладают.

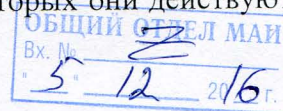
Имеется класс моделей - нейросетевые (НС) модели, для которых адаптивность представляет собой естественное свойство. Однако такие модели в их традиционном виде трактуют моделируемую систему как объект типа «черный ящик» и являются чисто эмпирическими, основанными на экспериментальных данных о поведении ДС. Данное обстоятельство существенно ограничивает традиционные НС-модели по доступному для них уровню сложности моделируемых систем и большинство задач, представляющих прикладной интерес, остаются за пределами возможностей таких моделей. Для преодоления указанных ограничений в качестве **цели** в диссертации стало получение класса гибридных нейросетевых математических моделей, в которые встроено доступное в виде дифференциальных уравнений теоретическое знание о ДС. Такой подход позволяет объединить достоинства традиционных моделей и компенсировать их недостатки: обеспечивает адаптивность, значительно повышает порог сложности решаемых задач, обеспечивает решение задач идентификации характеристик ДС.

**Объектом исследования** в диссертации является управляемая нелинейная ДС, действующая в условиях разнообразных неопределенностей, включая неполное и неточное знание о ДС и условиях ее функционирования, а также неопределенности из-за неконтролируемых внешних возмущающих воздействий и из-за изменения свойств ДС. Соответственно, **предмет исследования** в диссертации – это модели многомерных нелинейных управляемых ДС, обладающие свойством адаптивности, а также адаптивные законы управления движением ДС.

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

*Введение* посвящено обоснованию необходимости придания управляемым динамическим системам свойств адаптивности. Такая необходимость вытекает из ситуаций, возникающих в процессе функционирования систем и характеризующихся изменением их свойств. Соответственно, адаптивность должна обеспечиваться не только за счет корректировки законов управления ДС, но и путем корректировки самой модели ДС как объекта управления. Показано, что наиболее эффективным инструментом реализации таких систем являются нейросетевые технологии. Намечаются пути преодоления выявленных проблем, которые реализуются в последующих шести главах диссертации.

В *главе 1* рассматривается проблема моделирования управляемого движения нелинейных ДС. Вводится классификация таких систем, а также сред, в которых они действуют, вы-



являются задачи, требующие решения в рамках рассматриваемой проблемы. Осуществляется формализация понятий поведения и деятельности ДС, уточняется характер принимаемых во внимание неопределенностей. Результаты такого рассмотрения дают единый взгляд на ДС различных классов, а также позволяют дать постановку задачи моделирования ДС и сформулировать требования к искомой модели. Далее, в терминах решаемой проблемы вводится понятие адаптивности ДС, а также уточняется, за счет каких элементов ДС и каким образом обеспечивается получение ее адаптивности.

В главе 2 излагается нейросетевой подход к моделированию систем. В процессе формирования НС-моделей выявляются три основных задачи: построение параметризованного семейства математических моделей, в которое входит искомая НС-модель; получение обучающего набора данных с требуемым уровнем информативности; построение алгоритма обучения, осуществляющего параметрическую настройку формируемой НС-модели. Для решения первой задачи введен порождающий подход к формированию НС-моделей, заключающийся в выделении совокупности исходных элементов-примитивов и правил их комбинирования, обеспечивающих возможность получения иерархии НС-моделей. Вторая задача заключается в получении обучающего набора данных с требуемым уровнем информативности для структурного синтеза и параметрической настройки НС-модели. Эта задача решается с помощью непрямого подхода, который использует тестовое воздействие специального вида на исследуемую ДС с последующим анализом реакции системы на это воздействие. Третья задача состоит в конкретизации формируемой модели ДС средствами машинного обучения. При решении этой задачи возникают серьезные трудности, обусловленные очень сложным рельефом функции ошибки НС-модели. Предложен алгоритм решения данной задачи, который сводит исходную задачу к последовательности подзадач более простого вида.

В главе 3 рассматривается проблема нейросетевого моделирования ДС на примере управляемого движения летательных аппаратов. При этом используется аппарат динамических сетей традиционного типа - формируется модель типа «черный ящик». К числу наиболее востребованных моделей данного типа можно отнести сети типа NARX (нелинейная авторегрессия с внешними входами, реализованная средствами НС-технологии). Для выявления уровня возможностей такого рода моделей проведено решение конкретной прикладной задачи, результатом которой является НС-модель продольного углового движения ЛА нескольких классов, существенно отличающихся друг от друга своими динамическими свойствами. Было установлено, что в большинстве случаев получаемая динамическая NARX-модель обладает достаточно высокими быстродействием и точностью. Однако, обнаружилось существенные ограничения по уровню сложности моделируемых ДС, определяемому сочетанием числа переменных состояния и управления для ДС. Показано, что с ростом сложности задачи трудности использования NARX-моделей многократно возрастают, а с некоторого уровня сложности такие модели становятся вообще непригодными по реализуемой точности моделирования. Такого рода «рубежной» задачей в динамике полета ЛА является задача моделирования продольного углового движения маневренного самолета. Для успешного моделирования управляемых ДС с уровнем сложности, типичным для реальных прикладных задач, потребовалось создать новый класс моделей ДС, обладающих адаптивностью и свободных от недостатков традиционных НС-моделей. Эта проблема решается в главах 5 и 6.

В главе 4 результаты предшествующих глав используются для решения задачи нелинейного адаптивного управления на основе НС-технологий. Основное внимание уделяется проблеме отказоустойчивого управления ДС, связанного с восстановлением функциональности закона управления системой при внезапном изменении свойств ДС вследствие отказов ее оборудования и повреждений конструкции. Исследованы возможности адаптивных систем с точки зрения парирования неопределенностей различного вида, в первую очередь, неполное и неточное знание свойств объекта управления. Для ряда схем адаптивного управления проведена обширная серия вычислительных экспериментов, данные которых позволяют говорить о потенциально высокой эффективности НС-подхода к реализации механизма адаптивности. В то же время, при реализации этих потенциальных возможностей выявлена существенная за-

висимость работоспособности механизма адаптации от точности модели объекта, используемой в составе адаптивной ДС. Показано, что точность моделирования, обеспечиваемая чисто эмпирическими НС-моделями типа «черный ящик», в целом ряде случаев оказывается недостаточной для успешного функционирования механизма адаптации.

В главе 5 предлагается подход к решению проблемы ограниченности возможностей традиционных НС-моделей типа «черный ящик» с точки зрения доступного уровня сложности моделируемых ДС. Эта ограниченность вытекает из известного в НС-технологии соотношения между числом настраиваемых параметров сети и объемом набора доступных экспериментальных данных о поведении ДС, используемых в качестве обучающего набора. Объемы данных, реально доступных для ДС в большинстве приложений, диктуют необходимость снизить размерность НС-модели, но не в ущерб ее гибкости. Подход, предложенный в пятой главе, ориентирован на решение именно этой проблемы. Он состоит в создании полуэмпирической (гибридной) модели, основанной на встраивании в НС-модель теоретического знания, доступного для моделируемой системы. Такая мера позволяет резко снизить размерность НС-модели за счет того, что значительная часть ее теперь определяется соотношениями, перенесенными в сеть из теоретической модели, а настройке с использованием НС-обучения подвселяются только те элементы модели, которые отвечают имеющимся факторам неопределенности (например, если формируется НС-модель движения ЛА, то такими факторами являются аэродинамические характеристики ЛА). Для того, чтобы выявить специфику процесса формирования таких моделей, используется набор демонстрационных примеров. Результаты их решения наглядно показывают преимущество полуэмпирических НС-моделей по сравнению с чисто эмпирическими.

В главе 6 полуэмпирические НС-модели используются для решения задач моделирования движения ЛА и идентификации аэродинамических характеристик (АДХ) ЛА. Сначала рассмотрена относительно простая задача моделирования продольного углового движения ЛА, решавшаяся в третьей главе с использованием эмпирической НС-модели типа NARX. Сопоставление результатов показало существенно более высокую эффективность полуэмпирических НС-моделей по сравнению с эмпирическими НС-моделями. Применение развитого подхода к значительно более сложной задаче моделирования полного углового движения ЛА показало, что эта задача успешно решается с использованием полуэмпирической гибридной НС-модели, в то время как эмпирическому подходу она оказывается недоступной. Результаты вычислительных экспериментов убедительно показывают: предложенные в диссертации полуэмпирические НС-модели управляемых ДС по точности существенно превосходят традиционные динамические НС-модели; полуэмпирические гибридные НС-модели обладают требуемым свойством адаптивности, отсутствующим у моделей ДС в виде систем дифференциальных уравнений. Кроме того, полуэмпирические НС-модели позволяют решать задачи идентификации характеристик ДС, недоступные для традиционных НС-моделей типа «черный ящик». На примере идентификации АДХ ЛА демонстрируется, что эта задача может решаться с высокой точностью. По экспериментальным данным осуществляется восстановление АДХ как нелинейных функций многих переменных с высокой точностью, для всего диапазона значений переменных, от которых зависят АДХ, не прибегая к традиционно используемой линеаризации АДХ.

В заключении диссертации делается вывод, что полуэмпирический подход к моделированию управляемых динамических систем дает возможность решать задачу придания таким системам свойств адаптивности (в таких элементах, как модель ДС и ее закон управления), а также решать задачу идентификации характеристик ДС. Таким образом, научная проблема, сформулированная в качестве цели диссертации, успешно решена.

В приложении А даны результаты совокупности вычислительных экспериментов, выполнявшихся для оценки работоспособности предлагаемых моделей и методов, а также для демонстрации их возможностей.

В приложении Б показана серия диаграмм информативности для обучающих наборов, которые формировались при различных тестовых воздействиях на объект моделирования.

**Новые научные результаты**, представленные в диссертации:

1) Развита новая нейросетевая методика адаптивного моделирования динамических систем. Введено понятие порождающей системы, которое позволяет единообразным способом описывать статические и динамические НС, а также обеспечивает базу для автоматизации синтеза НС-моделей под заданные требования. Разработан комплекс алгоритмов синтеза динамических НС-моделей.

2) Предложено формирование гибридных полуэмпирических НС-моделей, позволяющих объединить теоретические знания о моделируемой системе и экспериментальные данные, характеризующие ее поведение. Введен класс гибридных математических моделей, позволяющий интегрировать теоретические знания о ДС в формируемую НС-модель, а также осуществить параметрическую настройку данной модели с помощью методов машинного обучения. Получены алгоритмы формирования информативных обучающих наборов, обеспечивающих применение методов машинного обучения.

3) Решена проблема идентификации нелинейных характеристик ДС, в том числе аэродинамических характеристик ЛА. Развита новая методика и создан комплекс алгоритмов, не требующий линеаризации искомым характеристикам (как это имеет место в случае применения традиционных методов), обеспечивающий нахождение этих характеристик как нелинейных функций многих переменных для всей области допустимых значений этих переменных.

Особо следует выделить подход, основанный на использовании гибридных НС-моделей. Реализация этого подхода позволила решить проблему размерности и осуществлять адаптацию модели в режиме реального времени, причем с повышением точности моделирования.

Научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, основаны на использовании методов теории систем и системного анализа, математического и компьютерного моделирования, а также нейросетевых технологий и нейросетевого моделирования. Корректное использование этих средств в диссертации обеспечивает **обоснованность** полученных результатов, а их **достоверность** подтверждается данными вычислительных экспериментов, выполненных в большом объеме для каждого из существенных вопросов, связанных с моделированием и управлением адаптивных ДС, а также путем сравнения этих данных с имеющимися представительными данными физических экспериментов с ДС.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что предложенный класс полуэмпирических НС-моделей ДС, основанный на сочетании теоретических знаний о моделируемой системе и экспериментальных данных о ее поведении, существенно расширяет область применения математического и компьютерного моделирования, представляющего собой один из ключевых элементов процессов создания технических систем. Умение эффективно решать задачи моделирования для таких систем открывает, в свою очередь, новые возможности для решения задач управления их поведением, отсутствующие при использовании традиционных средств математического моделирования.

**Практическая значимость** полученных результатов состоит в том, что появляется возможность создания перспективных технических систем с расширенными возможностями, в частности, летательных аппаратов различных классов, действующих в условиях разнородных неопределенностей.

Основные результаты, выносимые на защиту, **опубликованы** в 86 печатных работах, среди которых 1 монография, 23 статьи в журналах из перечня ведущих рецензируемых изданий ВАК РФ, 9 статей в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus, 42 статьи в источниках, индексируемых в РИНЦ. Получено 5 свидетельств о государственной регистрации программных комплексов на ЭВМ. Основные результаты диссертационной работы **доклаживались и обсуждались** на 40 международных, всероссийских и отраслевых конференциях и семинарах.

**Автореферат** полностью отражает содержание диссертации.

**Замечания** по содержанию диссертационной работы:

1. Инкрементное обучение является перспективным инструментом корректировки НС-моделей, позволяющим наращивать возможности модели, не прибегая к ее полному переобучению. По этой причине данный подход заслуживает более подробного рассмотрения, чем это имеет место в диссертации.

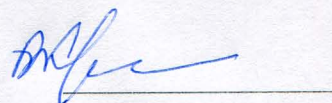
2. Вставочные нейроны и подсети позволяют ввести механизмы адаптивности внутрь НС-модели, тогда как традиционные механизмы адаптации являются внешними по отношению к модели или закону управления. Оба подхода (внутренние и внешние механизмы адаптации) имеют как достоинства, так и недостатки. Сопоставление и сравнительный анализ механизмов адаптации с этой точки зрения в диссертации отсутствует, что не позволяет обоснованно принять решение в пользу одного из этих механизмов при решении конкретных прикладных задач.

3. Один из важных этапов преобразования исходной теоретической модели в ее НС-представление, а именно, преобразование модели ДС с непрерывным временем в модель с дискретным временем, дается слишком сжато и не позволяет прочувствовать специфику этого процесса.

4. Показано, что полумпирические НС-модели управляемых ДС по точности традиционные динамические НС-модели типа NARX. Для полного представления о точности полумпирической НС-модели следовало бы сравнить ее с более продвинутыми моделями, например с сетями глубокого обучения.

Указанные замечания не влияют на общий высокий научный уровень диссертационной работа Тюменцева Ю.В., в которой решена крупная научная проблема, имеющая важное теоретическое и практическое значение в области моделирования управляемых динамических систем. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Считаю, что автор диссертации, Тюменцев Юрий Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)».

Официальный оппонент,  
Руководитель Центра оптико-нейронных технологий  
ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН  
член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук  
Крыжановский Борис Владимирович



117218, Россия, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1  
Тел.: +7 499 124-48-64  
E-mail: kryzhanov@niisi.ras.ru

Подпись Крыжановского Б.В. заверяю:

*Тюменцев Ю.В.*

