

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель Генерального директора
Федерального государственного унитарного
предприятия «Центральный аэрогидродинамический
институт им. проф. Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»)

Суханов В.Л.

2016г.



ОТЗЫВ

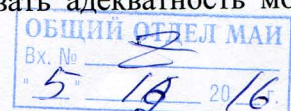
ведущей организации на диссертацию Тюменцева Юрия Владимировича на тему «Нейросетевое моделирование адаптивных динамических систем», представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)»

Актуальность работы. Обеспечение безопасности полетов летательных аппаратов (ЛА) – одна из важнейших проблем авиационной техники. Она обусловлена тем, что в ходе полета ЛА могут возникать различного рода особые (нештатные) ситуации (ОС) вследствие выхода из строя элементов системы управления, вследствие повреждений планера ЛА, изменяющих аэродинамические характеристики, а также свойства ЛА как динамической системы (ДС). При возникновении особой ситуации необходимо пытаться предотвратить перерастание аварийной ОС в катастрофическую. В целом ряде случаев это может быть осуществлено за счет корректировки законов управления движением ЛА, направленной на восстановление его характеристик устойчивости и управляемости до уровня, обеспечивающего безопасное завершение полета. Такая корректировка (реконфигурация) законов управления состоит в перераспределении функций между органами управления, оставшимися исправными, а также в учете изменений в аэродинамических и динамических характеристиках ЛА. Решение этой задачи целесообразно возлагать на механизмы адаптации, обеспечивающие для ЛА как для динамической системы возможность оперативно приспосабливаться к меняющемуся состоянию ДС и условиям, в которых она функционирует.

Концепция адаптивности ДС помимо существенного повышения безопасности полета и живучести ЛА играет также важную роль при решении еще одного комплекса проблем, связанных с созданием и эксплуатацией таких объектов авиационной техники, как роботизированные беспилотные ЛА, которые должны обладать высокой степенью автономности при решении ими целевых задач в самых разнообразных условиях.

В области адаптивных ДС в последние годы достигнуты значительные успехи, однако по-прежнему остаются проблемы, для которых отсутствуют удовлетворительные решения. В частности, важнейшее значение при решении задач анализа поведения, синтеза управления и идентификации характеристик адаптивных ДС имеют методы и средства математического и компьютерного моделирования. Характерными для ДС данного класса являются высокий уровень сложности реализуемых процессов, их многомерность, нелинейность и нестационарность, наличие разнородных неопределенностей в параметрах и характеристиках ДС, а также в особенностях среды, с которой взаимодействует ДС.

Диссертация Тюменцева Ю.В. посвящена решению **актуальной** проблемы получения адаптивных динамических систем с требуемыми свойствами. Адаптивность ДС при этом обеспечивается за счет воздействия как на законы ее управления, так и на модели ДС, используемые в системе управления. При этом важно обеспечить адаптивность модели ДС с тем, чтобы при изменении свойств ДС была возможность оперативно восстанавливать адекватность модели объекту моделирования.



В диссертации показана целесообразность использования для решения данной проблемы методов и средств математического и компьютерного моделирования, основанных на концепции искусственной нейронной сети (НС). Показано, что методы традиционного НС-моделирования, ориентированные на получение для ДС моделей типа «черный ящик», имеют ограниченные возможности при решении связанных с ЛА задач анализа, синтеза и идентификации. В диссертации предложен комбинированный подход к моделированию адаптивных ДС, позволяющий объединить достоинства традиционных моделей движения ЛА (представленных в форме систем дифференциальных уравнений) с достоинствами динамических НС-моделей (в первую очередь – это их адаптивность). Этот класс моделей (модели типа «серый ящик» или полуэмпирические модели) позволяет объединить теоретические знания о ДС с экспериментальными данными о ее поведении. От теоретических моделей полуэмпирические модели наследуют точность и интерпретируемость основных соотношений, полученных «из первых принципов», от НС-моделей – адаптивность как возможность их оперативной перенастройки.

Соответственно, **цель** диссертационной работы состоит в получении комплекса методов и средств математического и компьютерного моделирования адаптивных ДС, основанных на объединении теоретических знаний и экспериментальных данных, относящихся к исследуемой системе и обеспечивающих решение трех основных классов задач, связанных с ДС: анализ поведения, синтез управления, идентификация ДС и их характеристик. При этом **объектом исследования** являются управляемые ДС, действующие в условиях разнообразных неопределенностей, включая неконтролируемые воздействия на ДС; неполное и неточное знание свойств ДС и условий, в которых они функционируют; неопределенностей, порождаемых изменением свойств ДС вследствие отказов оборудования и повреждений конструкции. В этих условиях **предмет исследования** – многомерные нелинейные управляемые ДС, обладающие свойством адаптивности, обеспечиваемым за счет изменчивости законов управления ДС и моделей их поведения.

Общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Общий объем ее составляет 466 страниц, в том числе 288 страниц основного текста и 178 страниц приложений, 276 рисунков, 10 таблиц. Список использованной литературы содержит 211 наименований.

Во введении обосновывается необходимость наделения ДС свойствами адаптивности, что позволяет эффективно решать задачу реконфигурации законов управления ДС при возникновении особых ситуаций, а также открывает новые возможности в части решения проблемы роботизации беспилотных ЛА. Показано, что реализация адаптивных ДС требует формирования нового подхода к их математическому и компьютерному моделированию, поскольку модель объекта управления является неотъемлемой и критически важной частью практически всех схем адаптивного управления ДС. Выявляются проблемы, которые возникают на пути решения проблемы адаптивного моделирования, намечаются пути их решения. Обосновывается необходимость использования нейросетевых технологий для формирования и эксплуатации адаптивных ДС, дается характеристика трудностей, возникающих при этом. Рассмотрению указанных проблем посвящены последующие шесть глав диссертации применительно к трем основным задачам, традиционным для управляемых ДС: анализу поведения ДС, синтезу законов управления ДС, идентификации ДС и их характеристик.

В первой главе формулируется проблема моделирования управляемого движения нелинейных ДС, перечисляются задачи, требующие решения. С позиций общей теории систем формируются иерархии определений ДС и сред, в которых они функционируют, формализуются понятия поведения и деятельности ДС, уточняется характер учитываемых неопределенностей. Это обеспечивает единый контекст для рассмотрения динамических систем различных классов, в рамках которого формулируется постановка задачи моделирования ДС, а также требования к формируемой модели ДС. В рассматриваемом контексте вводится понятие адаптивности ДС, а также уточняются элементы ДС, оперативно корректируемые для обеспечения ее адаптивности.

Во второй главе рассматривается НС-подход к решению задач моделирования ДС и управления ими. Выявляются три основных элемента процесса синтеза НС-моделей: построение семейства моделей, включающего искомую НС-модель; получение информативного набора экспериментальных данных, необходимого для структурной корректировки и параметрической настройки НС-модели; построение алгоритма обучения, осуществляющего выделение искомой модели из сформированного семейства, основываясь на имеющихся экспериментальных данных. Первая из этих трех задач решается в рамках предложенного в диссертации порождающего подхода к формированию НС-моделей, представляющего собой развитие аналогичного подхода, используемого в вычислительной математике. Для решения второй задачи, которая заключается в получении информативного обучающего набора, используется непрямой подход, состоящий в формировании специального входного управляющего сигнала, объединяющего управляющий сигнал для реализации тестового маневра с возбуждающим сигналом для получения возмущенного движения ДС. Третий составной элемент для реализации процесса синтеза НС-моделей представляет собой комплекс средств для обучения НС-моделей, т.е. для их структурной корректировки и параметрической настройки. Для преодоления трудностей, связанных с обучением динамических НС-моделей, предложен алгоритм, основанный на сведении исходной задачи к последовательности подзадач, сходящийся к решению исходной задачи.

В третьей главе изучается проблема моделирования управляемого движения ДС с использованием НС-технологий. Необходимость привлечения этих технологий обосновывается тем, что традиционные модели движения ДС в виде систем дифференциальных уравнений не обеспечивают удовлетворения требования адаптивности, в то время как НС-модели изначально обладают таким свойством. Первоначально исследуются возможности динамических НС-моделей традиционного типа, рассматривающие объект моделирования как «черный ящик». НС-модели такого типа являются единственно возможными в случае, когда отсутствуют теоретические знания о ДС и имеются только экспериментальные данные о ее поведении. Наиболее востребованной в приложениях является НС-модель типа NARX, представляющая собой нелинейную авторегрессию с внешним входом и реализуемую в виде рекуррентной слоистой динамической сети с элементами задержки на входах сети и обратными связями между ее слоями. Оценка работоспособности данного подхода выполнена на примере формирования НС-модели для продольного углового движения ЛА нескольких классов, существенно отличающихся друг от друга по динамическим свойствам. Показано, что в задачах такого уровня сложности, которая определяется числом переменных состояния и управления, а также величиной их области определения, НС-модели традиционного типа в большинстве случаев достаточно эффективны с точки зрения их быстродействия и точности. Однако эти результаты выявили также ограничения, присущие традиционным НС-моделям. Они не всегда удовлетворяют требованиям по точности даже в задачах невысокой размерности, например, в задаче моделирования продольного углового движения ЛА. С ростом размерности задачи эти трудности многократно возрастают. Пути преодоления указанных трудностей рассматриваются в главах 5 и 6.

В четвертой главе, рассматривается задача НС-реализации адаптивных ДС, в том числе применительно к задаче отказоустойчивого управления ДС. Сопоставляются возможности нескольких схем адаптивного управления (АУ), включая АУ с эталонной моделью, АУ с прогнозирующей моделью, АУ с инверсной моделью и АУ на основе метода обратной задачи динамики. Для этих схем АУ проведена обширная серия вычислительных экспериментов (их результаты представлены в приложении А) для ЛА различных классов. Полученные результаты показывают высокую эффективность НС-подхода к реализации АУ применительно к парированию воздействия неопределенностей различных видов, включая те из них, что порождаются отказами оборудования и повреждениями конструкции ЛА.

В пятой главе решается указанная в главе 3 проблема, заключающаяся в ограниченности возможностей динамических НС-моделей традиционного типа. Предлагаемый подход к ее решению состоит во включении в традиционную НС-модель теоретического знания о моделируемой ДС, что позволяет резко сократить размерность формируемой модели, понимаемую как число настроечных параметров в ней. В итоге получается комбинированная НС-модель типа

«серый ящик» (называемая в диссертации полуэмпирической НС-моделью), формируемая на основе теоретических знаний о ДС, представленных в форме дифференциальных уравнений, а также экспериментальных данных о ее поведении, используемых в качестве обучающего набора при параметрической настройке и структурной корректировке НС-модели. Специфика процесса формирования таких моделей поясняется на демонстрационном примере, убедительно показывающем превосходство по точности полуэмпирических НС-моделей по сравнению с традиционными НС-моделями даже на простых задачах, причем с ростом сложности решаемой задачи разрыв в точности для этих двух классов моделей быстро растёт.

В *шестой главе* показана высокая эффективность полуэмпирических НС-моделей. Здесь они использованы для решения задачи формирования моделей движения ЛА, а также для идентификации аэродинамических характеристик (АДХ) ЛА. В первом примере рассматривается продольное угловое движение маневренного самолета с формированием полуэмпирической НС-модели. Результаты, полученные с использованием этой модели (типа «серый ящик»), сопоставляются с ранее приведенными в главе 3 результатами для традиционной НС-модели (типа «черный ящик»). Эти результаты убедительно показывают превосходство по точности введенных в диссертации НС-моделей типа «серый ящик» в сравнении с традиционными НС-моделями типа «черный ящик». Кроме того, полуэмпирическая модель обеспечивает возможность в процессе ее формирования одновременно решить задачу идентификации АДХ самолета (безразмерные коэффициенты подъемной силы и момента тангажа в рассматриваемой задаче), тогда как традиционная НС-модель не позволяет решать данную задачу в силу особенностей ее структурной организации. Вторая рассматриваемая в этой главе задача представляет собой формирование полной модели углового движения маневренного самолета, для которой исходная теоретическая модель включает 14 обыкновенных дифференциальных уравнений и три управляющих переменных (углы отклонения управляющих поверхностей). Полученная полуэмпирическая НС-модель обеспечивает высокую точность моделирования, кроме того, с высокой точностью решается задача восстановления АДХ самолета по экспериментальным данным (пять из шести коэффициентов аэродинамических сил и моментов, шестой – коэффициент аэродинамического сопротивления восстанавливается в рамках отдельной задачи). При этом реализованный в диссертации подход к идентификации АДХ существенно отличается от традиционного, основанного на линеаризованном представлении зависимостей для аэродинамических сил и моментов, действующих на ЛА. В полуэмпирическом подходе АДХ трактуются как целостные нелинейные функции нескольких переменных, рассматриваемых на всей области определения их аргументов. Значения частных производных коэффициентов сил и моментов по соответствующим параметрам полета при необходимости могут быть получены из результатов решения, полученных в рамках полуэмпирического подхода.

В *Приложениях* приводятся результаты обширной серии вычислительных экспериментов, выполненных с целью верификации и демонстрации возможностей разработанных моделей и методов. Эти результаты показывают возможности НС-технологий в части адаптивного отказоустойчивого управления, а также в части парирования воздействия неопределенностей других видов. Представлены результаты вычислительных экспериментов, наглядно показывающие характер влияния двух составляющих тестового сигнала – тестового маневра и возбуждающего сигнала, на информативность получаемого обучающего набора, что весьма важно с точки зрения получения НС-модели с требуемыми характеристиками точности.

Научная значимость работы. В диссертационной работе Ю.В. Тюменцева крупная научная проблема, состоящая в формировании подхода к математическому и компьютерному моделированию адаптивных динамических систем, решена с привлечением методов и средств нейросетевых технологий.

При решении данной проблемы сделан существенный вклад в три научные области.

Во-первых, – вклад в область нейросетевых технологий, являющихся эффективным инструментом изучения как управляемых, так и неуправляемых нелинейных динамических систем. Этот вклад заключается во введении понятие порождающей математической модели

нейронной сети, позволяющей унифицировать ее математическое представление как статической (без обратных связей), так и динамической (с обратными связями) НС. Это дает возможность автоматизировать трудоемкий процесс формирования НС-моделей под заданный комплекс требований к ним.

Во-вторых, – вклад в математическое моделирование ДС. А именно, в рамках порождающего подхода к формированию НС введен и развит новый класс математических моделей ДС (полуэмпирические НС-модели), представляющих собой модели гибридного типа, объединяющие теоретические знания об объекте моделирования и экспериментальные данные о его поведении. Этот класс моделей позволил объединить достоинства и компенсировать недостатки традиционных математических моделей, а именно, моделей движения ДС в виде дифференциальных уравнений и обычных НС-моделей типа «черный ящик». Данный класс моделей (его можно отнести к типу «серый ящик») позволяет получать точные и быстродействующие модели ДС, обладающие свойством адаптивности, что представляется весьма важным при использовании таких моделей в составе систем управления ЛА, особенно в ситуациях, когда у объекта управления изменились динамические свойства и требуется восстановить адекватность модели объекту моделирования.

В-третьих, – это вклад в методику идентификации характеристик ДС. А именно, средствами полуэмпирического НС-моделирования решена задача идентификации характеристик ДС, в частности, АДХ ЛА. В отличие от подхода, доминирующего в практике решения задач идентификации АДХ, основанного на линеаризованном представлении аэродинамических сил и моментов и «точечном» их рассмотрении, в диссертации предложен и реализован подход, при котором коэффициенты сил и моментов восстанавливаются на основе экспериментальных данных о поведении ЛА как нелинейные функции многих переменных во всей области определения этих переменных. Такого рода восстановление, осуществляемое в процессе формирования полуэмпирической модели, дает возможность определять АДХ с достаточной точностью. Из полученного функционального представления АДХ при необходимости могут быть получены значения производных аэродинамических сил и моментов по различным параметрам полета. Аналогичным образом можно решать задачи идентификации не только для АДХ, но и для других характеристик ДС.

Полученные в работе результаты обеспечили возможность решения задач анализа, синтеза и идентификации для адаптивных ДС, что в свою очередь позволило решить задачу формирования адаптивных систем, устойчивых к отказам оборудования и повреждениям конструкции ДС.

Практическая ценность работы. Предложенный в диссертации класс НС-моделей ДС, а также методы синтеза и параметрической настройки таких моделей открывают новые возможности для решения задач управления поведением сложных технических систем, включая их роботизированные варианты, в условиях неопределенности. Роботизация ЛА, осуществляемая на этой основе, позволит существенно повысить их эффективность при решении сложных целевых задач, а также выживаемость в неблагоприятных условиях. Полученные результаты могут быть использованы разработчиками перспективных ЛА при формировании алгоритмов адаптивного и интеллектуального управления, а также анализа их поведения и решения задач идентификации характеристик.

Рекомендации по практическому использованию и развитию результатов работы.

Рекомендуется интенсифицировать работы по приложению полученных методов и средств к решению задач идентификации АДХ для БПЛА, прежде всего малоразмерных, для которых задача нахождения АДХ по данным летного эксперимента особенно актуальна.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в ГосНИИ ГА, ЛИИ, МНПК Авионика, МИЭА, ГосНИИ АС, а также в других организациях, занимающихся разработкой систем управления ЛА, а также определением АДХ ЛА по результатам летных испытаний.

Целесообразно вводить в учебные программы студентов авиационных специальностей тематику НС-моделирования ДС, в том числе рассмотренные в диссертации модели и методы, как эффективный инструмент анализа, синтеза и идентификации характеристик ЛА.

Обоснованность и достоверность результатов. Научные результаты получены в диссертации с привлечением методов системного анализа, математического и компьютерного моделирования, вычислительной математики и нейросетевого моделирования. Эти методы, корректно используемые в диссертации, адекватны решаемой проблеме, что позволяет говорить об обоснованности полученных результатов. Достоверность этих результатов подтверждается данными обширного цикла вычислительных экспериментов, а также сопоставлением их с имеющимися данными физических экспериментов.

Апробация работы. В процессе выполнения диссертационной работы получаемые результаты представлялись для обсуждения на 21 международной, 13 всероссийских и 5 отраслевых конференциях.

Публикация результатов. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, с достаточной полнотой представлены в монографии, в 86 публикациях в рецензируемых журналах и сборниках научных трудов, а также в сборниках тезисов конференций. В том числе: 23 статьи в журналах из перечня ВАК РФ, 9 статей в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 42 публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертации.

1. Нет подробного алгоритмического описания для нахождения значений функций коэффициентов аэродинамических сил и моментов по параметрам движения ЛА; дается только краткое описание общей идеи для такого алгоритма. Значения этих функций важны для задач анализа устойчивости и управляемости ЛА и синтеза системы управления.

2. Не рассмотрен вопрос влияния работы системы управления на эффективность идентификации АДХ.

3. Недостаточно глубоко рассмотрена проблема применения обученной на математической модели НС для ЛА, динамические свойства которого отличаются от модельных.

4. Отсутствуют оценки эффективности применения для формирования нового типа математических моделей ДС (полуэмпирических НС-моделей) параллельных вычислений, которые при современном уровне развития вычислительной техники являются действенным средством построения НС-моделей.

Указанные недостатки не снижают научной и практической ценности полученных в диссертации результатов.

Общая оценка работы. Диссертация Ю.В. Тюменцева представляет собой самостоятельную завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему, связанную с решением крупной научной проблемы. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют большое теоретическое и практическое значение. Верификация соответствующих моделей и методов выполнена в обширной серии вычислительных экспериментов, результаты которых подтверждают эффективность предлагаемого подхода.

Работа отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)».

Отзыв обсужден на заседании НТС НИО-15 НИК Безопасности полетов, протокол №7 от 24 ноября 2016 г.

Начальник НИО-15 НИК Безопасности полетов

Заместитель начальника НИО-15

Заместитель начальника отдела

к.т.н., доцент Баженов С.Г.

д.т.н., доцент Бюшгенс А.Г.

д.т.н., доцент Дубов Ю.Б.