

На правах рукописи



Петров Алексей Алексеевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
АДАПТИВНОГО И НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Елец – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина» (ЕГУ им. И.А. Бунина).

Научный руководитель: **Масина Ольга Николаевна**,
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующая кафедрой математического
моделирования и компьютерных технологий
Елецкого государственного университета
им. И.А. Бунина

Официальные оппоненты: **Афанасьев Валерий Николаевич**,
доктор технических наук, профессор, профессор
департамента прикладной математики
Московского института электроники и математики
Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики» (МИЭМ НИУ ВШЭ),
г. Москва

Федосин Сергей Алексеевич,
кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизированных
систем обработки информации и управления
Национального исследовательского Мордовского
государственного университета им. Н.П. Огарева,
г. Саранск

Ведущая организация: **Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской
академии наук, г. Москва**

Защита диссертации состоится «5» июня 2019 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 в ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», а также на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ» www.rsreu.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор техн. наук, доцент



Перепелкин
Дмитрий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Структурные изменения в процессе функционирования, многорежимность, разнородность описания процессов относятся к особенностям технических систем с переключениями. Систему с переключениями можно представить в виде многорежимной динамической системы с законом переключения режимов, определяющим интервалы активности каждого режима. В связи с этим важным и интенсивно развивающимся научным направлением является математическое моделирование технических систем с переключениями. Актуальными задачами в этом направлении являются построение и анализ моделей указанных технических систем. Подобные системы находят многочисленные применения в прикладных проблемах управления механическими системами, технологическими процессами в переключающихся преобразователях мощности, в управлении движением беспилотных летательных аппаратов, автоматизированных систем транспорта, робототехнических систем и в других областях.

В настоящее время развитие информационных технологий в значительной степени определяется темпами развития программного обеспечения (ПО). Современное ПО характеризуется быстрым ростом объема и сложности, что приводит к снижению его общей надежности из-за большого количества ошибок и уязвимостей. Таким образом, вопросы надежности ПО выходят на первый план на пути дальнейшего развития информационных технологий. Решение всех перечисленных проблем возможно на базе технологий универсальных микропроцессоров с архитектурой «Эльбрус». Указанные технологии обеспечивают высокую производительность процессорного ядра за счет параллельного исполнения операций при экономном энергопотреблении, обеспечивают полную и эффективную двоичную совместимость с самой распространенной в мире архитектурной платформой Intel x86, x86-64, а также предоставляют эффективные средства надежного программирования на базе аппаратно поддерживаемых защищенных вычислений. Благодаря этому микропроцессоры с архитектурой «Эльбрус» рассчитаны на широкий спектр применений, а их технологии постоянно совершенствуются и не уступают лучшим зарубежным аналогам.

Кроме того, в настоящее время особое внимание уделяется вопросам открытости программного обеспечения. Подавляющее большинство открытого ПО является одновременно бесплатным и свободным, предоставляя пользователям права на неограниченное повторное распространение, запуск и изменение кода. Позиции открытого ПО становятся более прочными, поскольку многие крупные коммерческие компании и государственные организации по всему миру полностью или частично переходят на его использование. В настоящей диссертации используется только открытое ПО, поэтому существует возможность переноса разработанных программных средств на новые отечественные и зарубежные высокопроизводительные платформы. Работа по внедрению отечественной программно-аппаратной платформы с применением открытого программного обеспечения при

моделировании различных типов организационно-технических систем проводится в ведущих научно-исследовательских организациях России, в том числе в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук.

Степень разработанности темы. Для описания процессов динамики технических систем с переключениями используется теория дифференциальных включений. Динамические системы с фазовыми ограничениями, описываемые дифференциальными включениями, рассмотрены в работах А.Ф. Филиппова, В.И. Благодатских, Л.С. Понтрягина. Вопросы существования и устойчивости решений дифференциальных включений изучены в работах А.Ф. Филиппова, А.А. Толстоногова, А.И. Панасюка, В.А. Байдосова, А.А. Шестакова, Ю.Н. Меренкова, Н.П. Балабаевой, В.С. Климова, О.В. Дружининой и в работах других исследователей.

Вопросы проектирования и устойчивости систем с переключениями рассмотрены в работах M. S. Branicky, D. Liberzon, A.S. Morse, W.P. Dayawansa, C.F. Martin, Z. Sun, S. S. Ge, H. Yang, B. Jiang, G. Tao, D. Zhou, С.Н. Васильева, А.И. Маликова, О.Я. Шпилевской, К.Ю. Котова и других исследователей. Методам математического моделирования нелинейных неопределенных динамических систем, представимых системами с параметрами, зависящими от состояния, посвящены работы В.Н. Афанасьева. Вопросы исследования управляемых систем с неполной информацией изучались в работах Н.Д. Егупова и К.А. Пупкова, А.А. Пегата, Д.А. Поспелова, Б. Лю, Д. Дрянкова, В.И. Гостева, В.В. Круглова, М.Н. Дли, Р.Ю. Голунова, А.И. Трофимова, А.А. Рогозы, Д. Рутковской, С.Н. Васильева и в работах других исследователей.

В последние десятилетия большое внимание уделяется изучению систем с переменной структурой. Начиная с 60-х годов прошлого века, в работах С.В. Емельянова и его учеников изучались стационарные линейные системы второго порядка, переключение в которых происходит согласно сигналу ошибки. В дальнейшем результаты этих работ были обобщены для систем произвольного порядка с нестационарными правыми частями. Изучение систем с переменной структурой стало перспективным направлением, опирающимся на достижения школы С.В. Емельянова. Дальнейшее изучение данной проблематики привело к тому, что на сегодняшний день системы с переменной структурой обычно рассматриваются согласно принципу преднамеренного введения в скользящие режимы, в результате использования которых достигается полная независимость уравнений движения от факторов неопределенности.

Одним из актуальных направлений при изучении динамики технических систем является адаптивное моделирование. Под адаптивной моделью понимается модель, которая является инвариантной по отношению к различным входным параметрам и воздействиям среды, а также сохраняющая адекватность при определенных изменениях в описываемой системе. Для моделей с переменной структурой, авторегрессионных моделей, моделей с полиномиальной аппроксимацией и сплайн-аппроксимацией представляет

теоретический и прикладной интерес принцип построения моделей с адаптивными свойствами.

При моделировании технических систем могут быть использованы различные программные средства, представляющие широкие возможности для построения компьютерных моделей и проведения вычислительных экспериментов. Однако, многие программные продукты не содержат библиотек для численных и символьных расчетов и не обладают достаточной вычислительной сложностью. В связи с этим при исследовании моделей технических систем эффективным является применение прикладных математических пакетов и языков программирования общего назначения. Некоторые вопросы программного моделирования рассмотрены в работах А.Е. Гурьянова. Вопросы использования прикладного программирования в системе Octave рассмотрены в работах Е.Р. Алексеева, О.В. Чесноковой. Аспекты разработки программных моделей на языке Python рассмотрены в работе Дж.В. Пласа.

Построение прогнозирующих и управляющих логических компонентов динамических систем связано с разработкой алгоритмов искусственного интеллекта. В данном направлении эффективным является использование искусственных нейронных сетей (ИНС). К задачам, успешно решаемым с помощью ИНС, относятся следующие задачи: формирование моделей и различных нелинейных и трудно описываемых математических систем, прогнозирование развития этих систем во времени; принятие решений и диагностика, исключающие логический вывод, особенно в областях, где отсутствуют четкие математические модели; управление роботами, другими сложными устройствами. Уникальным свойством ИНС является их универсальность. Несмотря на то, что для перечисленных выше задач существуют эффективные математические методы решения, благодаря универсальности и перспективности для решения глобальных задач, например, построения искусственного интеллекта и моделирования сложных систем, нейронные сети являются универсальным инструментом решения задач. Характерная черта нейросети как универсального инструмента, заключается, в частности, в том, что нейросеть является гибкой моделью для нелинейной аппроксимации многомерных функций. Основной проблемой нейросетевого моделирования является необходимость разработки эффективных методов машинного обучения. Некоторые вопросы построения алгоритмов машинного обучения рассмотрены в работах М.Б. Беркинблита, С. Хайкина, Р. Каллана, М. Пилиньского, Д. Рутковской, Л. Рутковского, В.В. Круглова, М.Н. Дли, Р.Ю. Голунова, С.А. Федосина, Е.А. Немчиновой, Н.П. Плотниковой и в других работах. Алгоритмам глобальной оптимизации, используемым в задачах машинного обучения, посвящены работы D. Ashlock, V.G. Gudise, G.K. Venayagamoorthy, R. Storn, K. Price и работы других ученых.

Во многих технических задачах структура динамических систем и ее параметры известны с некоторой погрешностью. Следовательно, необходимым требованием к техническим системам является их устойчивость (в том или ином смысле) по отношению к структурным и внешним возмущениям.

Построение алгоритмов исследования устойчивости позволяет проводить анализ влияния различных проектных параметров на качество функционирования сложного технического устройства. Теории устойчивости динамических систем посвящены работы А.М. Ляпунова, Н.Г. Четаева, Е.А. Барбашина, В.В. Румянцева, В.В. Немыцкого, В.В. Степанова, А.А. Шестакова, Е.А. Гребеникова, Ю.А. Рябова, Б.П. Демидовича, В.И. Зубова, В.И. Воротникова, Н.Н. Красовского, И.Г. Малкина, В.М. Матросова, Х.А. Антосиевича, Т. Иосидзавы и других отечественных и зарубежных ученых.

Несмотря на интенсивные исследования в области моделирования технических систем, все еще остается открытым ряд вопросов, связанных с разработкой алгоритмов поиска оптимальных параметров движения с применением современных численных и интеллектуальных методов. В частности, требуют тщательной разработки многомерные задачи движения объектов в однородных и неоднородных полях возмущений, а также при динамическом изменении условий движения. Такие задачи являются актуальными для широкого класса летательных аппаратов, систем наземного, подводного и космического транспорта. Модели динамики летательных аппаратов рассмотрены в работах В.А. Санникова, А.Г. Юрескула, А.А. Лебедева, Л.С. Чернобровкина, В.П. Корячко, К.В. Мироновой и в работах других авторов. Примерами моделей технических систем с переключениями могут служить модель осциллятора с сухим трением, модель авторулевого судна и модель квадрокоптера.

В настоящей диссертации рассмотрена базовая модель динамики летательного аппарата при условии минимальности расхода топлива. Указанная модель модифицирована и обобщена на случай увеличения частоты переключений, динамического изменения граничных условий, действия нестационарных возмущений. Обобщенные модели можно использовать в задачах перемещения груза с помощью летательного аппарата в условиях, когда достижение конечной точки при движении вдоль поверхности земли невозможно. Кроме того, для изучаемых моделей разработаны алгоритмы численного поиска оптимальных параметров. Указанные алгоритмы реализованы в виде программного комплекса с использованием искусственных нейронных сетей. Проведена серия вычислительных экспериментов и их верификация с помощью вычислительного комплекса Эльбрус 801-РС.

Цель диссертационной работы – разработка методов и алгоритмов для программного комплекса адаптивного и нейросетевого моделирования технических систем с переключениями.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие научно-технические задачи:

- построение обобщенной модели динамики летательного аппарата при увеличении частоты переключений;
- модификация обобщенной модели динамики летательного аппарата на случай динамического изменения граничных условий;

- разработка и реализация в виде программного модуля алгоритма построения траектории движения с учетом условий оптимальности;
- построение обобщенной модели динамики летательного аппарата с учетом нестационарных возмущений;
- разработка и реализация в виде программного модуля алгоритмов поиска оптимальных параметров на основе развития методов случайного поиска и оптимизации роением частиц;
- разработка и реализация в виде программного модуля алгоритмов генерации переключений на основе численных и интеллектуальных методов;
- интеграция разработанных модулей в единый программный комплекс;
- проведение серии вычислительных экспериментов и их верификация с применением различных программно-аппаратных платформ.

Объект исследования. Объектом исследования диссертации являются модели движения летательных аппаратов под воздействием внешних возмущений. Результаты исследования закреплены в модельных экспериментах. На основе указанных результатов сформулированы основные выводы диссертации.

Предмет исследования. Предметом исследования являются методы и алгоритмы адаптивного и нейросетевого моделирования технических систем с переключениями.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

- построены обобщенные модели динамики летательных аппаратов при увеличении частоты переключений;
- разработаны и реализованы численные алгоритмы построения траекторий изучаемых моделей;
- построены обобщенные модели летательных аппаратов, описываемые дифференциальными включениями, на основе сочетания требований многозначности, точности позиционирования и оптимальности;
- разработаны и реализованы алгоритмы построения траекторий движения для изучаемых моделей;
- разработаны и реализованы алгоритмы поиска оптимальных параметров на основе развития методов случайного поиска и роевой оптимизации;
- проведена верификация результатов модельных экспериментов на основе сравнительного анализа новых и известных алгоритмов и с учетом сравнения свойств траекторий при различных начальных условиях;
- разработан программный комплекс моделирования технических систем с переключениями, оригинальность которого состоит в реализации новых алгоритмов поиска оптимальных параметров и алгоритмов генерации переключений, а также в апробации модулей указанного комплекса на отечественной программно-аппаратной платформе Эльбрус 801-РС.

Соответствие специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по пунктам: п. 2. Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей;

п. 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента; п. 5. Комплексные исследования научно-технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Внедрение результатов. Выполнено внедрение модулей программного комплекса на программно-аппаратной платформе Эльбрус 801-РС в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук. Кроме того, внедрение результатов диссертации осуществлено при разработке учебного курса в ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина», а также при моделировании траекторной динамики наблюдаемых космических объектов в астрономической обсерватории РГУ им. С.А. Есенина (акты приведены в приложениях к диссертации).

Методология и методы исследования. В диссертации использованы методы математического моделирования, теории устойчивости и качественной теории динамических систем, численные методы решения дифференциальных уравнений и численные методы оптимизации, метод моделирования на основе искусственных нейронных сетей.

Моделирование и разработка программного комплекса производилась на персональном компьютере с использованием системы Octave, на языке Python3 с использованием среды Jupyter, а также на вычислительном комплексе Эльбрус 801-РС с использованием языка Python2.

Основные положения, выносимые на защиту:

1 Построение моделей динамики летательных аппаратов с учетом точности позиционирования конечной точки и воздействия аэродинамических сил. Разработка модуля программного комплекса для построения траекторий движения.

2 Построение обобщенной модели технической системы с переключениями при воздействии нестационарных возмущений. Разработка модуля программного комплекса для описания обобщенной модели.

3 Разработка алгоритмов поиска оптимальных параметров на основе метода случайного поиска и метода оптимизации роением частиц, а также алгоритмов генерации переключений на основе численных и интеллектуальных методов. Реализация указанных алгоритмов в виде модулей программного комплекса.

4 Интеграция разработанных модулей в программный комплекс SSMC моделирования технических систем с переключениями, реализованный на языке Python3. Исследование динамики технических систем с переключениями с помощью разработанного программного комплекса. Верификация результатов моделирования на основе сравнительного анализа разработанных алгоритмов и на основе сравнения с аналитическими исследованиями. Апробация модулей программного комплекса на различных программно-аппаратных платформах.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов следует из того, что на всех этапах аналитического и численного решения задач использовались строгие и апробированные методы и для всех

утверждений приведены строгие обоснования. Достоверность результатов подтверждается сравнением с результатами других работ, а также сравнением результатов, полученных в ходе компьютерного моделирования изучаемых систем при конкретных начальных и граничных условиях, с результатами теоретических выводов.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные в работе результаты по моделированию технических систем могут найти применение при решении задач динамики летательных аппаратов, в ракетостроении, в робототехнике.

Эффект от применения алгоритмов, предложенных в работе, заключается в уменьшении затрат времени и энергетических затрат на создание векторной тяги, а также в высокоточном позиционировании.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 международных научно-технических конференциях (см. список публикаций).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ. Из них: 1 статья в журнале, входящем в международную базу Scopus, 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 4 тезиса докладов на международных научно-технических конференциях, 4 тезиса докладов на всероссийских и региональных конференциях, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. На защиту выносятся только те результаты, которые получены лично автором. В совместно опубликованных работах научному руководителю принадлежат постановки задач. Все известные результаты, полученные другими авторами, указаны в работе со ссылками на оригиналы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 181 страницу, собственно текст диссертации (без приложений) – 157 страниц, в том числе список использованных источников из 156 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, аргументирована научная новизна, охарактеризована практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен обзор работ отечественных и зарубежных исследователей по моделированию динамических систем с помощью дифференциальных включений и уравнений с разрывными правыми частями, а также обзор методов оптимизации и интеллектуальных методов анализа моделей систем с переключениями. Рассмотрены модели технических систем, приводящие к многозначности в правых частях, а также описаны подходы к редукции указанных моделей к моделям с переключениями на основе интеллектуальных методов. Показаны преимущества и недостатки интеллектуальных методов по сравнению с классическими методами моделирования.

Рассмотрены две подзадачи построения и анализа динамических моделей технических систем с переключениями, а именно, параметрическая оптимизация исходной модели и построение логики переключения модели. Для решения указанных подзадач охарактеризованы в контексте дальнейшего использования методы поиска оптимальных параметров на основе детерминированных алгоритмов, а также метод гравитационного поиска и эволюционные алгоритмы. Приведен сравнительный анализ.

Представлены используемые в диссертации положения теории искусственных нейронных сетей, дано обоснование нейросетевых алгоритмов как универсальных аппроксиматоров нелинейных динамических систем, в том числе в случаях, когда дифференцирование невозможно как аналитическими методами, так и численными методами. Дано обоснование выбора используемых в диссертации методов исследования динамических моделей технических систем с учетом постановки решаемых задач.

В качестве примеров моделей технических систем с переключениями в главе рассмотрены модели динамики твердого тела, в частности, модель осциллятора с сухим трением, модель авторулевого судна и модель квадрокоптера. Для модели квадрокоптера предложен переход от дифференциальных уравнений к дифференциальным включениям. Приведен обзор и дано обоснование выбора программных средств, используемых в диссертации для исследования моделей технических систем с переключениями.

В главе 1 описан класс изучаемых в диссертации моделей динамики технических систем с переключениями, который характеризуется наличием переменной тяги и различными типами условий оптимальности параметров, а также учитывающий различные типы внешней нагрузки, в том числе аэродинамической. Для указанных моделей предложены направления исследования на основе дифференциальных включений и перехода к дифференциальным переключениям. В частности, рассмотрена базовая модель динамики летательного аппарата при условии минимальности расхода топлива. Двумерная базовая модель задается следующим образом.

Пусть движение осуществляется в декартовых координатах x, y с начальной точкой $(0, 0)$ и делится на два этапа. На первом этапе, соответствующем интервалу $(0, t_1)$, объект перемещается на плоскости xOy под воздействием постоянной векторной тяги (p, q) до достижения высоты h . На втором этапе, соответствующем интервалу (t_1, t_2) , объект перемещается с постоянной векторной тягой $(-b, s)$, достигая конечной точки $L(l, 0)$. На объект действует сила тяготения. Движение считается допустимым, если значение $x(t)$ является постоянно возрастающим от 0 до l , $y(t)$ возрастает на первом этапе до высоты h и убывает до нуля на втором этапе. При этом в момент приземления t_2 , то есть когда $y(t_2) = 0$, получаем $x(t_2) = l$. Критерий оптимальности имеет вид:

$$\int_0^{t_1} (p + q) dt + \int_{t_1}^{t_2} (b + s) dt \rightarrow \min.$$

Физический смысл условия заключается в достижении конечной точки за наименьшее время и с наименьшими энергетическими затратами на создание

векторной тяги. Задача состоит в нахождении p, q, b, s, t_1, t_2 , удовлетворяющих критерию оптимальности.

Тогда дифференциальные включения

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &\in p, \\ m\ddot{y} &\in q - mg, & 0 \leq t < t_1, \\ m\ddot{x} &\in -b, \\ m\ddot{y} &\in s - mg, & t_1 \leq t \leq t_2, \end{aligned}$$

описывающие систему, сводятся к системе дифференциальных уравнений второго порядка

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= p, \\ m\ddot{y} &= q - mg, & 0 \leq t < t_1, \\ m\ddot{x} &= -b, \\ m\ddot{y} &= s - mg, & t_1 \leq t \leq t_2, \end{aligned}$$

с переключением в точке t_1 . Оптимальные значения параметров, удовлетворяющие исходным посылкам модели, найдены с помощью символьных вычислений математического пакета Mathematica. Рассмотренная базовая модель является упрощенной динамической моделью летательного аппарата при наличии единственного переключения. При этом не учитываются воздействие сопротивления среды и внешние возмущения других типов. В связи с этим в дальнейшем предполагается построение модели более высокой размерности.

Во второй главе проведено построение математических моделей динамики летательных аппаратов с учетом различных типов возмущений и условий функционирования, а именно, с учетом увеличения частоты переключений, действия аэродинамических сил, точности позиционирования конечной точки траектории. Для обобщенных моделей предложены алгоритмы численного поиска оптимальных параметров. На основе указанных алгоритмов разработан подмодуль программного комплекса, отвечающий за численное решение и графическое представление, на встроенном языке системы Octave. Численное решение выполнено с помощью усовершенствованных методов Рунге–Кутты. Указанный подмодуль позволяет проводить исследования для изучения динамики модели технической системы с переменной тягой в условиях действия аэродинамических сил с учетом точности позиционирования конечной точки траектории. Рассмотрены аспекты реализации базовых модулей программного комплекса моделирования систем с переключениями на отечественной программно-аппаратной платформе.

В главе 2 на основе базовой модели выполнен синтез и анализ следующих моделей: 1) трехмерной модели с учетом увеличивающейся частоты переключений; 2) трехмерной модели с учетом аэродинамических сил и точности позиционирования.

На основе аналитических значений оптимальных параметров разработана программа на языке Octave для построения траекторий и фазовых плоскостей. Указанная программа интегрирована в состав модуля программного комплекса

SSMC. Фазовые траектории двумерной системы относительно изменения значений h и t представлены на рисунке 1.

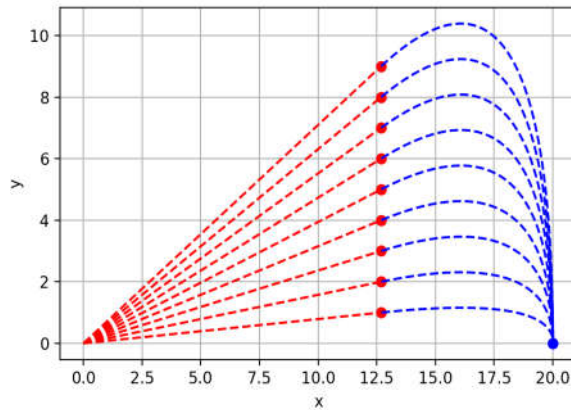


Рисунок 1 – Фазовые траектории с учетом точек переключения для двумерной системы

Далее рассмотрена модификация двумерной модели, приведенной в первой главе, для случая позиционирования конечной точки. Под позиционированием конечной точки понимается перемещение точки в дополнительной плоскости xoz . Предложен алгоритм генерации переключений модели, состоящий из трех шагов.

Шаг 1. Движение в модели динамики летательного аппарата происходит из начальной точки $(0, 0, 0)$ до точки $H(0, h, 0)$. За время движения t_1 конечная точка достигает круга положений.

Шаг 2. Из всех возможных траекторий движения в модели динамики летательного аппарата выбираем ту, которая ведет в промежуточную точку назначения, далее осуществляем переключение на соответствующий этой траектории режим движения. За оставшееся время $t = t_2 - t_1$ будет обеспечено достижение плоскости xoz , с учетом направления в центр круга положений (рисунок 2). Движение проводится за время $t/2$, устанавливается новый круг положения и выбирается траектория, которая ведет в его центр.

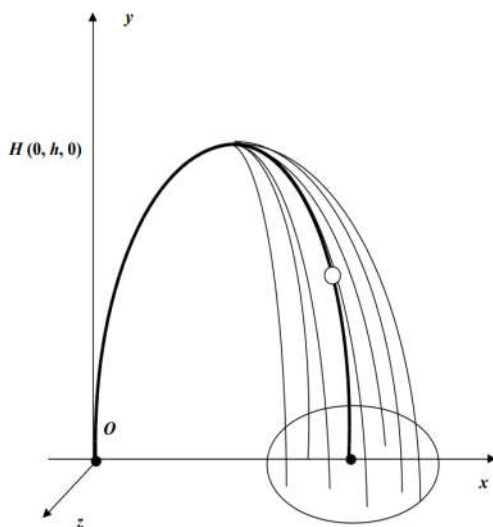


Рисунок 2 – Графическое изображение возможных траекторий на шаге 2

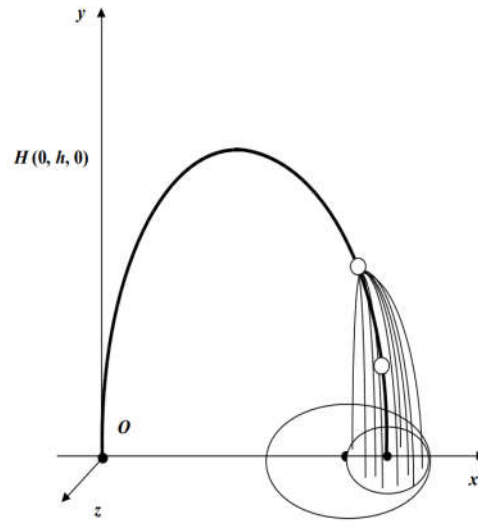


Рисунок 3 – Графическое изображение возможных траекторий на шаге 3

Шаг 3. Если радиус круга положений больше радиуса соответствия, то повторяется шаг 2, где время движения, за которое объект проходит половину маршрута в центр круга положений, уменьшается вдвое (рисунок 3). В результате нескольких повторений шага 2 приходим к кругу положений с радиусом меньше σ , что позволяет далее двигаться в центр круга положений с гарантированным попаданием в конечную точку.

Для реализации приведенного алгоритма исходная модель движения динамической системы модифицирована следующим образом. Пусть выбирается некоторый радиус перемещения проекции конечной точки r и радиус соответствия σ . На шаге 2 происходит последовательное решение системы уравнений при условии движения проекции конечной точки t_2 на ось Ox . Система, описывающая движение в модели динамики летательного аппарата, преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -R_1, & x(t_1) &= a_1, & \dot{x}(t_1) &= b_1, \\ m\ddot{y} &= -R_2 - g, & y(t_1) &= a_2, & \dot{y}(t_1) &= b_2, \\ m\ddot{z} &= R_3, & z(t_1) &= a_2, & \dot{z}(t_1) &= b_2, \end{aligned}$$

где R_1, R_2, R_3 – компоненты ускорения, действующие по осям x, y, z , a_1, a_2, a_3 – начальные значения. Величины b_1, b_2, b_3 можно вычислить по формулам:

$$b_i = \frac{x_k - x_{k-1}}{t_k - t_{k-1}},$$

где k – номер итерации алгоритма, $i = 1, 2, 3$. С учетом $\dot{x}(t_2) = 0, \dot{y}(t_2) = 0, \dot{z}(t_2) = \delta, a_1 = \frac{h}{2}, t_2 = \tau t_1$ режимы движения трехмерной системы определяются равенствами:

$$R_1 = -\frac{b_1}{t_1(1-\tau)}, \quad R_2 = -\frac{b_2}{t_1(1-\tau)} + g, \quad R_3 = -\frac{b_3}{t_1(\tau-1)} + \delta.$$

На основе предложенного алгоритма и полученных равенств разработан подмодуль программного комплекса для построения оптимальных траекторий на встроенном языке системы Octave. Указанный подмодуль отвечает за численное решение и графическое представление.

Траектории движения с оптимальными значениями R_1, R_2, R_3 , соответствующими однозначной реализации с учетом позиционирования конечной точки, при условиях $l=7, h=5, g=9.8, m=1, \sigma=1, a_1=0, a_2=0, a_3=0, b_1=0, b_2=0, b_3=0$, имеют вид, представленный на рисунках 4–7, где сплошными линиями изображены начальная, промежуточная и конечная траектории движения, точками обозначены моменты переключений, при этом все точки круга положений ограничены окружностями на плоскости xoz .

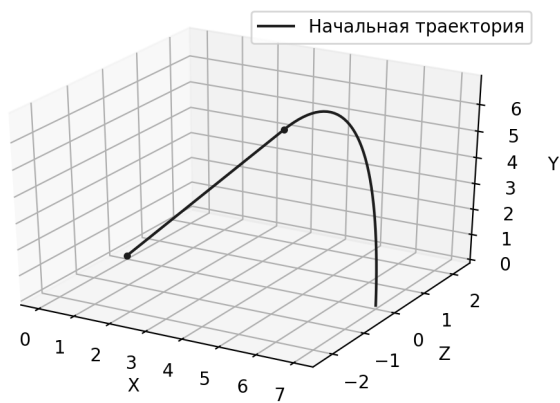


Рисунок 4 – Начальная траектория

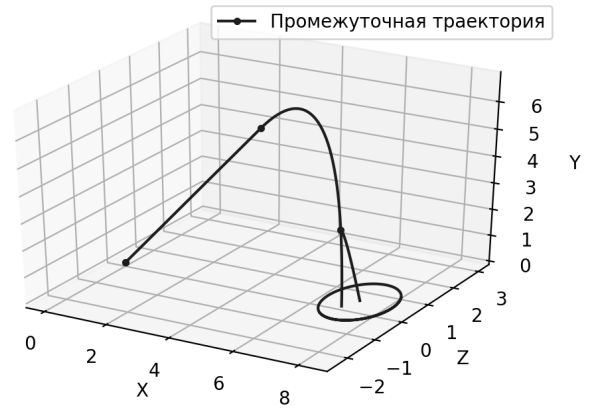


Рисунок 5 – Промежуточная траектория

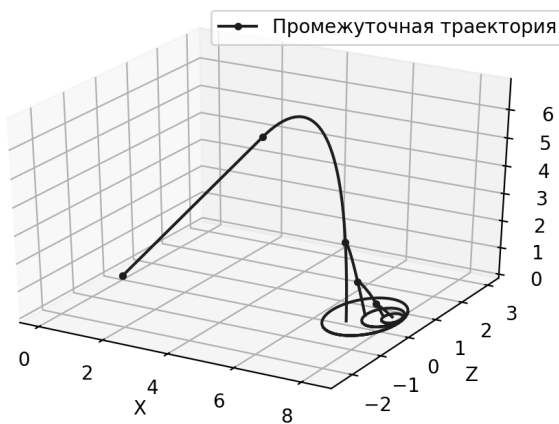


Рисунок 6 – Промежуточная траектория

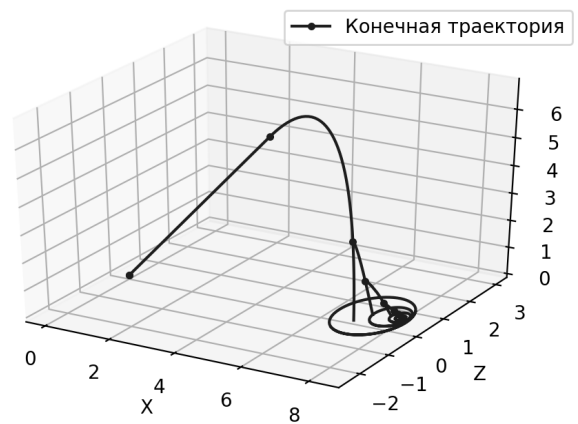


Рисунок 7 – Конечная траектория

Далее в главе 2 проведено моделирование с учетом аэродинамических сил и разработан алгоритм поиска оптимальных параметров с использованием искусственных нейронных сетей. В рамках разработанного программного комплекса проведены серии вычислительных экспериментов и проведена верификация моделей.

Пусть первоначально в модели динамики летательного аппарата осуществляется движение при постоянной векторной тяге с достижением высоты $(0, h, 0)$. На объект действует сила тяжести. Система рассматривается на конечном временном интервале $T \in [t_0, t_\Delta]$, в течение которого должно быть достигнута конечная точка, проекция которой перемещается в плоскости xoy согласно некоторому закону таким образом, что ее положение в любой момент времени известно. Предположим, что движение проекции тела имеет линейный характер, а сам объект имеет форму шара, вязким сопротивлением среды для которого можно пренебречь.

Проекцию силы сопротивления воздуха без учета вязкости можно представить в виде

$$\Phi = \frac{C\rho V^2 S}{2},$$

где C – коэффициент сопротивления, ρ – плотность среды, V – скорость движения, S – характерная площадь лобового сечения, для шара равная площади сечения, проходящего через центр. Абсолютный коэффициент воздействия среды $\frac{C\rho S}{2\sqrt{3}m}$ в скалярной форме по каждой оси движения можно записать в виде $\varphi = \frac{\Phi}{\sqrt{3}mV^2}$. Модельные уравнения движения системы примут вид:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= A_x - \varphi \dot{x}^2, x(t_0) = 0, \dot{x}(t_0) = s_{x_1}, \\ \ddot{y} &= A_y - g - \varphi \dot{y}^2, y(t_0) = h, \dot{y}(t_0) = s_{y_1}, \\ \ddot{z} &= A_z - \varphi \dot{z}^2, z(t_0) = 0, \dot{z}(t_0) = 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где A_x, A_y, A_z – компоненты ускорения по осям.

Далее рассмотрен вопрос об устойчивости состояний равновесия модели (1) с использованием дивергентного метода. Модель представлена в векторном виде и получены условия устойчивости на основе анализа свойств дивергенции векторных полей, определяемых правыми частями дифференциальных уравнений. Установлено, что если для модели (1) существует функция Ляпунова и в окрестности состояния равновесия выполнены условия, накладываемые на дивергенцию поля скоростей, то состояние равновесия асимптотически устойчиво.

С учетом условий б) далее в главе получен критерий устойчивости для двумерной модели на основе дивергентного метода, а именно, если для двумерной модели существует функция Ляпунова и в окрестности состояния равновесия выполнены условия $\operatorname{div} \varepsilon(x) = 0$, $\operatorname{div} \hat{\varepsilon}(x) = 0$, то состояние равновесия $x = 0$ асимптотически устойчиво.

Для поиска оптимальных параметров модели (1) далее в главе 3 использован метод искусственных нейронных сетей. Получен тренировочный критерий для нейросети

$$\eta(t_i) \left(\begin{pmatrix} l_i \\ 0 \\ k_i \end{pmatrix} - M_{i|Ai}(t_\Delta) \right)^2 + \theta(t_i) \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \dot{M}_{i|Ai}(t_\Delta) \right)^2 \rightarrow \min,$$

где

$$M_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix}, \quad A_i = \begin{pmatrix} A_{x_i} \\ A_{y_i} \\ A_{z_i} \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Критерий такого вида допускает торможение при приближении к конечной точке. Тренировка нейросети происходит на случайных значениях аргументов при расчете уравнений численными методами.

Далее в главе 2 разработан алгоритм обучения нейросети, состоящий из следующих шагов.

Шаг 1. Выбрать случайным образом в качестве тренировочных коэффициентов начальное и конечное время из пространства целевых значений, векторы начальных и конечных скоростей, векторы начальных и конечных координат объекта управления, а также коэффициент воздействия разреженной среды.

Шаг 2. Подставить значения в уравнения модели и найти значение A_i .

Шаг 3. Провести тренировку нейросети для полученных значений с помощью метода градиентного спуска. Если тренировочный критерий не выполняется, то перейти к шагу 2. В противном случае работа алгоритма заканчивается.

На основе приведенного алгоритма построен нейросетевой интегратор, реализованный в виде программы на языке Python, которая позволяет учитывать воздействие аэродинамических сил. Указанная программа входит в состав модуля программного комплекса SSMC. Проведен сравнительный анализ производительности разработанного алгоритма с алгоритмами, входящими в состав математической библиотеки Scipy.

В главе 3 рассмотрено обобщение изученной в разделе 2.2 главы 2 модели технической системы на случай нестационарных возмущений. Возмущения представлены в виде зависящих от параметра t полиномов первой и второй степеней. От двумерной модели осуществлен переход к модели, в которой векторная тяга задается с помощью функций от времени, что позволяет учесть дополнительное ограничение на нулевую скорость в конечной точке и перейти от движения в два этапа, соответствующих двум интервалам времени, к единственному этапу, соответствующему интервалу $t \in (0, t_2)$. Пусть модель описывается уравнением

$$m\ddot{x} = P \cdot T + mG + D,$$

где $x \in R^n$ – вектор состояний системы, G – вектор потенциального поля, D – вектор возмущений,

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{k1} & p_{k2} & p_{k3} & \cdots & p_{kn} \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} t^0 \\ t^1 \\ t^2 \\ \vdots \\ t^k \end{pmatrix}.$$

Для указанной модели разработаны алгоритмы поиска оптимальных параметров p_{ij} , $i = 1, \dots, k$, $j = 1, \dots, n$, на основе адаптивного поиска и роевой оптимизации, а именно, алгоритм «Адаптивный поиск», алгоритм «Потенциальный поиск».

Графическая интерпретация работы алгоритма «Потенциальный поиск» представлена на рисунке 8.

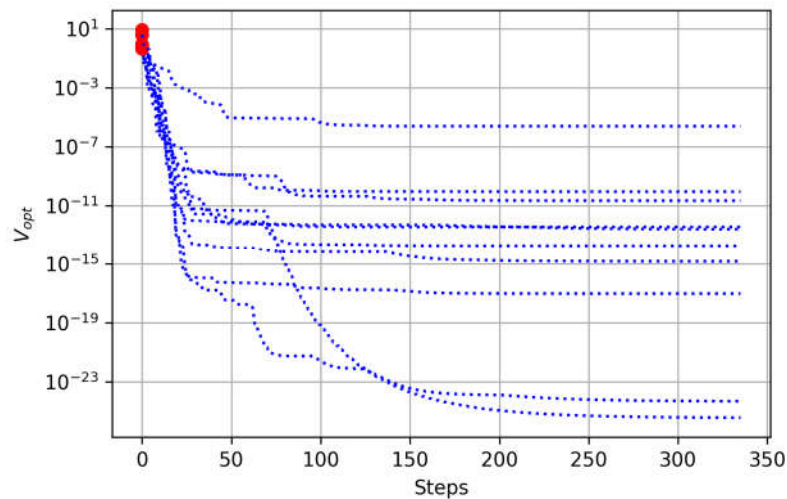


Рисунок 8 – Графическая интерпретация работы алгоритма «Потенциальный поиск» с применением функции Розенброка

Далее рассматривается линейная модель с переключениями, описываемая уравнением вида

$$m\ddot{x} = P \cdot T + mG + D, \quad P \in \Gamma,$$

где $x \in R^n$ – вектор состояний системы, Γ – дискретное отображение, ставящее в соответствие определенным моментам времени соответствующую матрицу коэффициентов, D – вектор внешних возмущений, который задается вектор-функцией $D(t, x)$. Для указанной функции справедливо неравенство: $\forall t, x: \|D(t, x)\| < \lambda$, где λ – ограничение на максимальное возмущение.

Для указанной модели разработаны алгоритмы генерации переключений при наличии линейных нестационарных режимов, а именно, алгоритм «Генерация переключений с возрастающей частотой», алгоритм «Стохастический алгоритм генерации переключений», алгоритм «Нейросетевой алгоритм генерации переключений», включающий в себя алгоритм «Алгоритм обучения нейросети».

В главе 4 описана реализация разработанных в главах 2 и 3 алгоритмов и их интеграция в программный комплекс «Switching System Modeling Complex». В указанный комплекс интегрированы, в частности, модуль численных решений и графического представления, и нейросетевой модуль, описанные в главе 2. Кроме того, в комплексе SSMC реализованы в виде программного кода разработанные в главе 3 алгоритмы поиска оптимальных параметров на основе развития методов случайного поиска и роевой оптимизации, а также алгоритмы переключений. Проведен сравнительный анализ результатов работы алгоритмов в рамках программного комплекса SSMC. Разработаны и реализованы функции библиотеки графического интерфейса на основе использования компонент библиотеки ipywidgets.

Внедрение отдельных модулей разработанного программного комплекса осуществлено с применением отечественной программно-аппаратной

платформы Эльбрус 801-РС. Структура и графический интерфейс программного комплекса SSMC представлен на рисунках 9, 10.

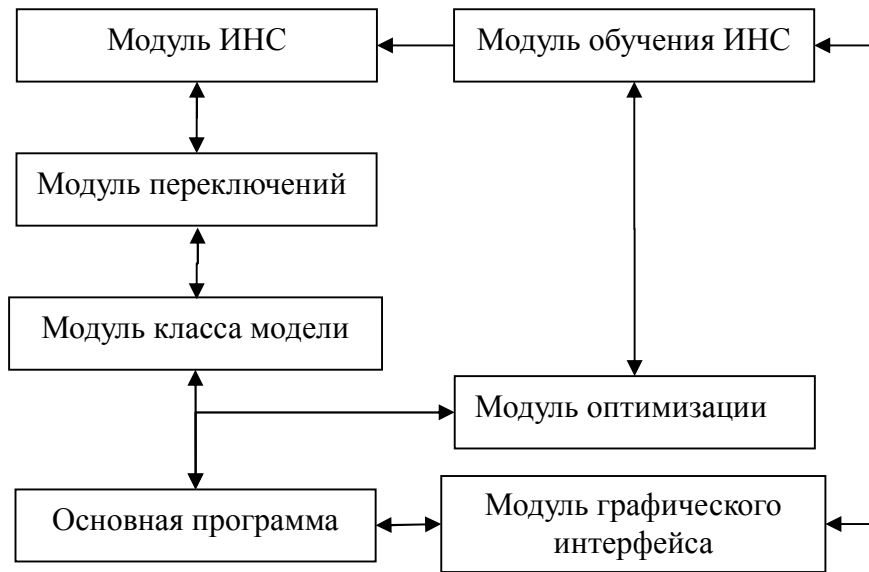


Рисунок 9 – Структура программного комплекса SSMC

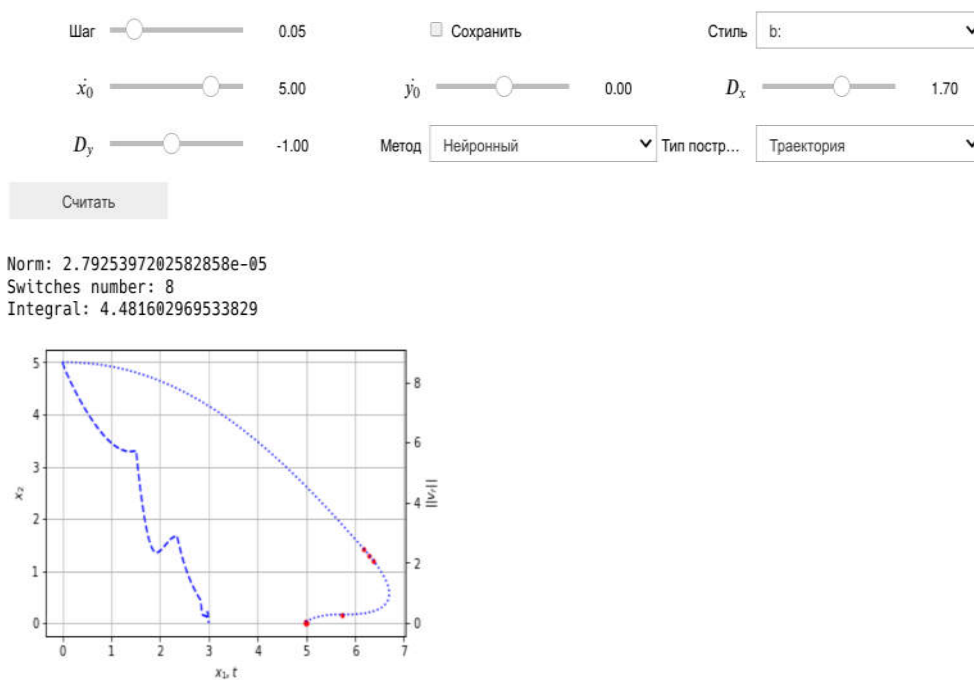


Рисунок 10 – Интерфейс программного комплекса SSMC

Модельные эксперименты продемонстрировали высокую эффективность позиционирования объекта при возмущениях ветрового типа для всех способов переключений, а также сходимости алгоритмов поиска оптимальных параметров.

Описаны проведенные вычислительные эксперименты для разработанных моделей технических систем с переключениями, проведена верификация результатов моделирования на основе сравнительного анализа разработанных

алгоритмов и на основе сравнения с аналитическими исследованиями. В частности, для нелинейной двумерной модели с учетом нестационарных возмущений проведен сравнительный анализ трех алгоритмов генерации переключений. В результате серии вычислительных экспериментов установлено, что алгоритм генерации переключений на основе искусственных нейронных сетей является универсальным по отношению к типам возмущений и эффективным в части экономии вычислительных ресурсов.

Разработанный программный комплекс обладает следующими особенностями.

1. Распространение в виде библиотек. Рассмотренные в диссертационном исследовании модели, а также проведенные вычислительные эксперименты являются лишь одним из случаев возможного применения данных библиотек. В частности, библиотеки искусственных нейронных сетей и библиотеки алгоритмов поиска оптимальных параметров могут быть использованы во многих задачах, связанных с оптимизацией и машинным обучением.

2. Возможность легкого конструирования простых графических интерфейсов для моделирования различных технических систем. Некоторые типовые возможности по работе с интерактивными элементами уже заложены в библиотеки (в частности, использование `ipywidgets`, `tkinter`).

3. Возможность дальнейшей реализации других типов интерфейса пользователя.

4. Масштабируемость. Использование объектно-ориентированного программирования позволяет расширить возможности применения программного комплекса, реализовать новые алгоритмы поиска оптимальных параметров и новые алгоритмы переключений.

В заключении описаны основные результаты, полученные в ходе выполнения работы, приведено сравнение эффективности работы различных алгоритмов, реализованных в виде программного комплекса.

В приложениях А, Б, В приведены листинги разработанного программного комплекса. Приложение А содержит модуль графического вывода и построения траекторий для трехмерной модели. Приложение Б включает в себя модуль нейросетевого интегратора. Приложение В содержит основной модуль, а также модуль класса модели, модуль оптимизации, модуль переключений и модуль графического интерфейса. **Приложение Г** содержит копию акта о внедрении результатов диссертации в учебный процесс ЕГУ им. И.А. Бунина. **Приложение Д** содержит копию акта о внедрении результатов диссертации в научно-исследовательский процесс астрономической обсерватории РГУ им. С.А. Есенина. **Приложение Е** включает в себя копию свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1 Построена модель динамики летательного аппарата при наличии переключений, выполнены ее модификации и обобщения, в частности, синтезирована нелинейная модель с учетом нестационарных возмущений.

2 Разработан алгоритм построения траектории движения с учетом условий оптимальности. Указанный алгоритм реализован в виде отдельного программного модуля с возможностью интеграции в программный комплекс.

3 Построена обобщенная многомерная модель с переключениями при воздействии внешних возмущений. Разработан модуль программного комплекса, описывающий параметры модели и реализующий вспомогательные математические операции.

4 Разработаны и реализованы алгоритмы поиска оптимальных параметров на основе развития методов случайного поиска и роевой оптимизации, а также алгоритмы генерации переключений на основе искусственных нейронных сетей. Проведен сравнительный анализ эффективности работы указанных алгоритмов.

5 Разработанные в диссертации алгоритмы интегрированы в программный комплекс «Switching System Modeling Complex» на языке Python3 с использованием среды Jupyter и математических библиотек Numpy, Scipy, SymPy. Исследована динамика технических систем с переключениями с помощью разработанного программного комплекса. Проведена верификация результатов моделирования на основе сравнительного анализа разработанных алгоритмов и на основе сравнения с аналитическими исследованиями. Модули программного комплекса апробированы и внедрены на отечественной программно-аппаратной платформе Эльбрус 801-РС.

6 Проведенный анализ показал согласованность аналитических выводов и численных результатов. Подход к моделированию технических объектов, основанный на переходе от упрощенных моделей к построению более сложных, позволил оценить влияние на динамику изучаемых технических систем таких важных для практики факторов, как увеличение точности позиционирования, действие аэродинамических сил, необходимость экономии топливных ресурсов.

Список основных публикаций по теме диссертационного исследования

Публикации в рекомендуемых изданиях из перечня ВАК

1. *Петров А.А.* Моделирование и построение алгоритма поиска оптимальных параметров управляемых динамических систем, описываемых дифференциальными включениями // *Нелинейный мир*. 2017. Т. 15. № 4. С. 47–52.
2. *Дружинина О.В., Масина О.Н., Петров А.А.* Модель управления движением транспортной системы с учетом условий оптимальности, многозначности и вариативности // *Транспорт: наука, техника, управление*. 2017. № 4. С. 3–9.
3. *Дружинина О.В., Масина О.Н., Петров А.А.* Разработка подхода к решению задач управления движением технических систем, моделируемых дифференциальными включениями // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2017. Т. 15. № 4. С. 64–72.
4. *Дружинина О.В., Масина О.Н., Петров А.А.* Разработка алгоритмов поиска значений параметров моделей управляемых систем с учетом условия минимальности расхода топлива // *Вестник РГРТУ*. 2018. № 64. С. 46–54.

5. *Петров А.А.* Структура программного комплекса для моделирования технических систем в условиях переключения режимов работы // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2018. Т. 23. № 4. С. 61–64.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе Scopus

6. *Druzhinina O.V., Masina O.N., Petrov A.A.* Models for the control of technical systems motion taking into account optimality conditions // *Proceedings of the VIII International Conference on Optimization Methods and Applications «Optimization and Applications» (OPTIMA–2017)*, Petrovac, Montenegro, October 2–October 7, 2017. Published at <http://CEUR-WS.org> 10.11.2017. Vol. 1987. P. 386–391.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

7. *Масина О.Н., Петров А.А.* Программа для численного расчета движения в условиях вариативности, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017618567 от 5 июня 2017 года.

Прочие публикации

8. *Петров А.А.* О нечеткой логике в построении баз знаний самообучающихся систем управления, основанных на прецедентах // *Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию со дня рождения профессора А.А. Шестакова «Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования»* (Елец, 2–3 апреля 2015 г.). Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2015. С. 109–115.
9. *Петров А.А.* Об управлении движением транспортной системы, описываемой дифференциальными включениями // *Материалы научно-практического семинара молодых ученых и студентов «Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования»* (Елец, 15–16 декабря 2016 г.). Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2016. С. 82–85.
10. *Петров А.А.* Алгоритмы поиска оптимальных траекторий для моделей управляемых технических систем // *Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем»* (Москва, 24–28 апреля 2017 г.) М.: РУДН, 2017. С. 330–332.
11. *Масина О.Н., Петров А.А.* Вопросы управления движением транспортной системы с изменяющимися параметрами // *Материалы международной научно-практической конференции «Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем»* (Елец, 1–4 февраля 2017 г.). Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2017. С. 342–344.
12. *Петров А.А.* Оптимальное управление движением технической системы в условиях многозначности и вариативности // *Материалы молодежной секции в рамках Третьей Международной научно-практической*

конференции «Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования» (Елец, 26 апреля 2017 г.). Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2017. С. 66–69.

13. *Петров А.А.* О нахождении оптимальных параметров движения динамических систем, моделируемых дифференциальными включениями // Материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 15-17 ноября 2017 г.). Рязань: РГРТУ, 2017. С. 72–74.
14. *Петров А.А.* Алгоритмы поиска оптимальных параметров для динамических систем, описываемых дифференциальными включениями // Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам естественных наук (Липецк, 4 октября 2017 г.). Липецк: ЛГПУ, 2017. С. 69–71.
15. *Петров А.А., Масина О.Н., Дружинина О.В.* Поиск оптимальных параметров движения для нелинейных динамических систем с многозначностью // Материалы молодежной секции в рамках IV Международной научно-практической конференции «Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования» (Елец, 25 апреля 2018 г.). Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2018. С. 79–86.

Петров Алексей Алексеевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
АДАПТИВНОГО И НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Формат 60 x 84/16. Гарнитура Times. Печать трафаретная.

Печ.л. 1,0 Уч.-изд.л. 1,25

Тираж 100 экз. Заказ 5

Подписано в печать 04.02.2019

Отпечатано с готового оригинал-макета на участке оперативной полиграфии
ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28,1