

На правах рукописи



**Кочергин Максим Игоревич**

**Методика и алгоритмы визуального моделирования  
непрерывных и дискретно-непрерывных физико-технических задач  
методом компонентных цепей**

Специальность 05.13.18

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель – **Дмитриев Вячеслав Михайлович**, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Горюнов Алексей Германович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой – руководитель отделения ядерно-топливного цикла на правах кафедры Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Вячкин Евгений Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры математики и математического моделирования Новокузнецкого института (филиала) Кемеровского государственного университета

Ведущая организация – Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится 26 декабря 2019 года в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.268.02 Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ТУСУР <https://postgraduate.tusur.ru/urls/alg4id4> и в библиотеке по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2019 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Зайченко Татьяна Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Широкое распространение в различных областях физики и техники для исследовательских, образовательных целей или в рамках задачи функционального проектирования находят физико-технические задачи (ФТЗ). ФТЗ характеризуются отсутствием априорной информации о структуре модели: так, например, при моделировании технических систем заранее известна и в достаточной мере формально представлена информация о структуре будущей модели некоторого искусственного устройства, в то время как структура модели физической системы формируется в ходе процессов осмысления, формализации и непосредственно моделирования и при этом может изменяться (ввиду процедур упрощения или усложнения модели, учёта новых факторов и пр.). ФТЗ представляет собой постановку некоторой проблемы о техническом (искусственном) объекте, решаемую с помощью различных знаний из специализированных разделов физики и имеющую определённое практическое или исследовательское значение.

В данной работе рассматриваются ФТЗ о сложных динамических объектах. Под сложностью объекта понимается: 1) сложность его поведения, 2) сложность его структуры и его связей, 3) переменный, зависящий от времени и режимов, состав моделируемых объектов, 4) взаимодействие объектов различной природы (например, устройства с дискретным поведением и объекта с непрерывным поведением).

Исследованию сложных динамических систем в целом посвящены работы Ю.Б. Колесова, Ю.Б. Сениченко, Ю.В. Шорникова, А.В. Бессонова, Р. Mosterman, F. Cellier, C.W. Gear. Моделированию физических задач с применением метода компонентных цепей в аспекте образовательной деятельности посвящены исследования А.Ю. Филиппова, О.Н. Шаровой. В работах Е.А. Арайса, В.М. Дмитриева, А.В. Шутенкова, Т.Н. Зайченко заложены и развиты основы метода компонентных цепей (МКЦ), которые получили продолжение в работах Т.В. Ганджи, В.М. Дмитриева в виде метода многоуровневых компонентных цепей (ММКЦ), направленного на моделирование химико-технологических систем и предполагающего декомпозицию компьютерной модели системы на 3 уровня: объектный, логический и визуальный. Эта концепция декомпозиции отвечает изменчивой структуре ФТЗ и соответствует разделению поведения физических систем на непрерывное (физическое), дискретное (логическое или алгоритмическое) и визуальное. Однако ММКЦ на текущий момент (как и среда моделирования (СМ) MARC – комплекс программ, реализующий данный метод) не имеет инструментов для эффективного моделирования ФТЗ, методики формализации таких задач и алгоритма построения их моделей.

Необходимо отметить, что в практике моделирования ФТЗ в качестве инструмента, как правило, применяются математические пакеты, языки программирования, специализированные САПР, среды моделирования, не отвечающие в полной мере специфике решения ФТЗ.

В связи с вышеизложенным **актуальным** является развитие и адаптация

ММКЦ для моделирования ФТЗ (обладающих как непрерывным, так и дискретно-непрерывным поведением и включающих геометрическую составляющую), формирование методики их многоуровневого моделирования, а также разработка программных средств для построения многоуровневых компьютерных моделей ФТЗ и обучения основам их моделирования.

**Цель работы** – разработка методики, алгоритма и программных средств моделирования для исследования непрерывных и дискретно-непрерывных ФТЗ, а также реализация на его основе комплекса программ для моделирования и обучения моделированию физико-технических задач.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Описание и классификация ФТЗ и средств их моделирования.
2. Разработка алгоритма многоуровневого компьютерного моделирования ФТЗ, включающего этапы формализации моделируемой задачи и её многоуровневой декомпозиции на объектный, логический (алгоритмический) и визуальный уровни.
3. Разработка средств моделирования для отображения физических свойств объектов, геометрических свойств их межобъектных связей в ФТЗ, а также инструментов для моделирования дискретно-непрерывного (гибридного) поведения объектов с реализацией механизма компенсации накапливаемой амплитудно-временной погрешности.
4. Разработка на базе поисковых методов оптимизации метода численной аппроксимации для приближения табличных результатов моделирования ФТЗ функцией произвольного вида.
5. Разработка комплекса программ для многоуровневого моделирования ФТЗ на базе СМ МАРС, включающего библиотеку моделей компонентов для моделирования ФТЗ, программный модуль для самостоятельного обучения моделированию ФТЗ и информационную систему управления виртуальной лабораторией моделирования ФТЗ для сопровождения аудиторных занятий по моделированию.

**Объектом исследования** являются дискретно-непрерывное поведение объектов, их физические свойства и геометрические свойства их связей в ФТЗ.

**Предметом исследования** являются модели дискретно-непрерывного поведения объектов, их физических свойств и геометрических свойств их связей в ФТЗ и алгоритмы их исследования.

**Научная новизна работы:**

1. В области математического моделирования. Предложен алгоритм моделирования ФТЗ, отличительной особенностью которого является возможность автоматизации перевода естественного языкового представления модели в формальное представление ММКЦ. Разработаны единицы языка многоуровневых компонентных цепей для моделирования физических свойств, гибридного поведения (с применением диаграмм состояний) объектов и геометрических свойств их межобъектных связей в ФТЗ, отличающиеся от существующих более высоким уровнем абстракции. Предлагаемые диаграммы состояний отличаются от других средств моделирования гибридного поведения тем, что представляют собой самостоятельный элемент имитационной модели

объекта, отдельный от его аналитической модели, а также реализуют механизм компенсации накапливаемой амплитудно-временной погрешности.

2. В области численных методов. Предложен численный метод аппроксимации результатов моделирования ФТЗ, базирующийся на решении задачи аппроксимации комбинацией поисковых методов и отличающийся от существующих тем, что позволяет находить коэффициенты приближающей функции произвольного вида (не требуя при этом аналитических преобразований), обеспечивающие глобальный, а не только локальный минимум суммы квадратов отклонения аппроксимирующей функции от аппроксимируемой. Разработан численный алгоритм компенсации амплитудно-временной погрешности, отличающийся от существующих тем, что заключается в решении задачи обратной интерполяции и обеспечивает неитерационный расчёт точки перехода дискретного состояния.

3. В области комплексов программ. Предложен алгоритм функционирования диаграмм состояний, отличающийся тем, что применим для математических моделей, представленных не только в аналитическом виде, но и схемотехническом и структурном. Впервые разработан алгоритм формализации текстовых условий ФТЗ, позволяющий автоматизировать процедуру перевода естественного языкового описания задачи в компонентное описание в соответствии с формализмом ММКЦ.

**Теоретическая значимость** работы определяется вкладом в развитие общей теории моделирования, а именно развитием метода многоуровневых компонентных цепей. Произведена интерпретация диаграмм состояний в язык моделирования алгоритмических конструкций ММКЦ, что в отличие от других инструментальных средств позволяет строить модели гибридных систем, представленные как в блочно-символьном (аналитическом) виде, так и в компонентном виде. Впервые на основе решения задачи обратной интерполяции предложен алгоритм компенсации накапливаемой амплитудно-временной погрешности, возникающей при смене состояний дискретно-непрерывной системы. Впервые предложен численный метод аппроксимации, основанный на комбинации поисковых методов оптимизации, позволяющий находить глобальный минимум отклонения аппроксимируемой функции от аппроксимирующей за счёт исследования ряда локальных минимумов.

**Практическая значимость.**

1. Разработанные библиотека моделей компонентов для моделирования ФТЗ и компьютерная модель штангового глубинного насоса, построенная с её использованием, были использованы в АО «Энергонефтемаш» для определения оптимальных эксплуатационных характеристик нефтедобывающей установки и построения алгоритма работы системы управления штанговым глубинным насосом.

2. Результаты работы (комплекс программ, алгоритмы моделирования ФТЗ, численный алгоритм аппроксимации) использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» при преподавании дисциплин «Компьютерное моделирование физических задач», «Основы компьютерного моделирования

физико-технических задач», «Моделирование систем», а также при организации работы учебной лаборатории «Элементы и устройства робототехнических систем».

Результаты работы применялись в следующих НИР:

1. «Исследование и разработка интеллектуальной системы управления штанговым глубинным насосом для поддержания оптимального динамического уровня жидкости в нефтяной скважине» (соглашение № 14.574.21.0157 от 26 сентября 2017 г.) – по федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 гг.».

2. «Разработка программных средств автоматической параметризации компьютерных моделей эколого-экономических систем предприятий нефтегазовой промышленности», грант РФФИ №16-37-00027, 2016–2017 г.

**Обоснованность и достоверность** результатов научного исследования обеспечивается глубоким анализом работ в данной тематике, корректностью использованных методов и подтверждается сравнением качества и точности численного моделирования с применением разработанного комплекса программ с результатами моделирования в других инструментальных средах (*Simulink, Rand Model Designer, Mathcad, Matlab*) и успешным решением практических задач.

**Методы исследования.** В работе применялись методы системного анализа, компьютерного моделирования, численные методы оптимизации, методы теории конечных автоматов, теории гибридных автоматов. При разработке комплекса программ использовались методы объектно-ориентированного программирования и проектирования программного обеспечения.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Разработанный алгоритм многоуровневого моделирования ФТЗ и методика многоаспектного анализа ФТЗ детерминируют их приведение к формализму ММКЦ для дальнейшего построения моделей в СМ МАРС, а также позволяют автоматизировать процедуру перевода словесного описания ФТЗ в формальное. Разработанные единицы языка ММКЦ позволяют строить модели ФТЗ из блоков высокого уровня абстракции, снижая при этом размерность аналитической модели, решаемой вычислительным ядром СМ МАРС, вследствие предварительного решения части уравнений модели имитационным ядром. (*Область исследований: 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений*).

2. Интерпретированные в язык ММКЦ диаграммы состояний позволяют моделировать ФТЗ, математические модели которых представляются не только в символьном виде, но и в схемотехническом и структурном, обеспечивая при этом компенсацию амплитудно-временной погрешности моделирования, возникающей и накапливающейся при смене дискретных состояний гибридного поведения объекта. (*Область исследований: 2. Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей*).

3. Разработанный численный метод аппроксимации на базе поисковых методов позволяет аппроксимировать табличные результаты моделирования ФТЗ приближающими функциями произвольного вида, обеспечивая выбор глобального минимума отклонения значений приближающей функции от аппроксимируемой из ряда локальных минимумов. (*Область исследований: 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента*).

4. Разработанный комплекс программ состоит из 3 блоков, нацеленных как непосредственно на моделирование ФТЗ, так и на обучение их моделированию. *Библиотека компонентов* позволяет строить наглядные и адекватные визуальные модели непрерывных и дискретно-непрерывных ФТЗ из компонентов высокого уровня абстракции. *Программный модуль обучения* формирует (за счёт использования методов автоматического анализа текста) пользовательские справочные инструкции о процедуре формализации и декомпозиции словесного портрета введённой в него ФТЗ при внеаудиторной работе учащихся, направленной на развитие навыков анализа и моделирования задач. *Информационная система управления лабораторией моделирования* сопровождает аудиторные занятия студентов и организует их взаимодействие с электронными курсами и средой моделирования. (*Область исследований: 8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования*).

**Апробация результатов.** Основные положения данного исследования докладывались и обсуждались на 18 международных и всероссийских конференциях: Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2015, 2016, 2017, 2018), Международной конференции студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2016, 2017, 2018, 2019), Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2016, 2017, 2018, 2019), Открытой выставке научных достижений молодых учёных ТУСУРа «РОСТ.ур» (Томск, 2016), Международной научно-методической конференции «Современное образование: развитие технологий и содержания высшего профессионального образования как условие повышения качества подготовки выпускников» (Томск, 2017), 55-ой Международной научной студенческой конференции (Новосибирск, 2017), XIV Международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии и системы» (Пенза, 2017), 17-ой Международной молодежной научно-практической конференции «Моделирование, фундаментальные исследования, теория, методы и средства» (Новочеркасск, 2017), Международной научно-методической конференции «Современное образование: повышение профессиональной компетентности преподавателей вуза – гарантия обеспечения качества образования» (Томск, 2018).

Основные результаты исследования изложены в 32 публикациях, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. Получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемой литературы из 140 наименований и 4 приложений. Общий объём основной части составляет 185 страниц и включает 101 рисунок и 12 таблиц.

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертационной работы получены автором лично. Совместно с научным руководителем осуществлялась постановка задач диссертационного исследования. Разработка информационной системы управления лабораторией моделирования ФТЗ осуществлялась совместно с научным руководителем и Ганджой Т.В.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

**В главе 1 «Компьютерное моделирование физических и физико-технических задач»** рассматриваются ФТЗ как объект моделирования, закладываются теоретико-методологические основы исследования.

**В параграфе 1.1 «Классификация физических и физико-технических задач»** приводится соотнесение понятий физическая задача (ФЗ), техническая задача (ТЗ) и ФТЗ, рассматриваются их классификации.

Рассматриваемый в работе подкласс ФТЗ может быть описаны как  $T = (P(a, x), G(a, x), S(a, x))$ , где  $P(a, x)$  – детерминированное непрерывное (физическое) поведение, описываемое системой алгебро-дифференциальных уравнений ( $x$  – переменные,  $a$  – параметры), определяющее непрерывное состояние системы;  $G(a, x)$  – геометрические свойства объекта и его межобъектных связей, описываемые системой алгебраические уравнений;  $S(a, x)$  – дискретное поведение (алгоритм функционирования), представленное графом переходов (определяющее дискретное состояние системы), вершины которого соответствуют некоторой подсистеме из  $P(a, x)$ , а ветви – переходы.

Приводятся следующие особенности ФТЗ, которые необходимо учитывать при выборе среды для создания их компьютерных моделей: 1) характер поведения объектов в задаче может быть как непрерывный, так и дискретно-непрерывный – например, мгновенные качественные изменения в модели непрерывного поведения; 2) геометрические свойства объектов в ФТЗ могут варьироваться (например, при смене типа связи между телами), поэтому должны моделироваться отдельным от основной системы уравнений блоком; 3) степень детализации задачи может изменяться в ходе моделирования; 4) предметной областью таких задач, является физика, что определяет набор требуемых типовых моделей (компонентов), которые могут представляться готовыми блоками; 5) при декомпозиции ФТЗ явно выделяются следующие уровни: непрерывное поведение, дискретное поведение, управляемое поведение (внешнее воздействие на модель со стороны исследователя).

**В параграфе 1.2 «Обзор систем компьютерного моделирования физико-**



*технических задач»* приводится обзор и сравнительный анализ инструментов, используемых для моделирования ФТЗ, по следующим критериям: 1) наличие инструментов для моделирования непрерывного и дискретно-непрерывного поведения объектов; 2) наличие инструментов для отображения геометрических свойств объектов и их связей; 3) возможность постепенной детализации модели; 4) наличие типовых блоков и возможность их настройки; 5) наличие готовых блоков, содержащих модели из предметной области; 6) возможность декомпозиции поведения объектов в задаче на уровни. Рассматриваются такие СМ как LabView, Simulink, VisSim, СМ MAPC, Rand Model Designer, иллюстрируются способы представления в них моделей.

*В параграфе 1.3 «Метод многоуровневых компонентных цепей для моделирования технических систем»* излагаются концепция, назначение, основные понятия метода, а также описывается многоуровневый подход к моделированию технических систем, заложенный в него.

Многоуровневый подход предполагает декомпозицию компьютерной модели исследуемого объекта на три уровня (рис. 1).

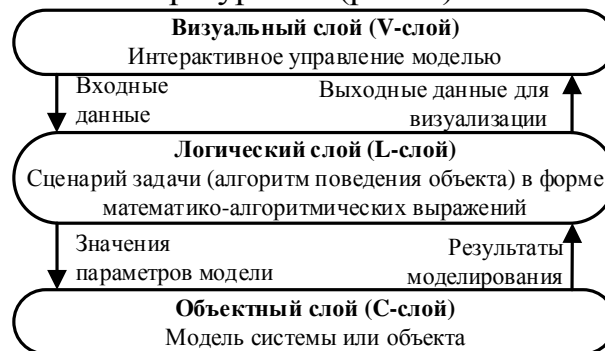


Рисунок 1 – Структура многоуровневого представления моделей

**В главе 2 «Многоуровневый подход к моделированию физических и физико-технических задач»** представляется разработанный подход к моделированию ФТЗ с применением модернизированного ММКЦ.

*В параграфе 2.1 «Алгоритм моделирования физико-технических задач»* описывается разработанный алгоритм моделирования ФТЗ, включая декомпозицию ФТЗ с применением методики многоаспектного анализа.

Краткая графическая иллюстрация алгоритма моделирования ФТЗ представлена ниже (рис. 2).



Рисунок 2 – Алгоритм моделирования ФТЗ

Предложенная методика многоаспектного анализа задач детерминирует процедуру формализации словесного портрета (условий) ФТЗ со слабоструктурированными исходными данными и построения её многоуровневой модели в СМ MAPC в соответствии с формализмом ММКЦ. Для моделирования ФТЗ выделяется 3 взаимосвязанных аспекта с

соответствующими им субаспектами:

1) *Физико-математический аспект* описывает физические процессы, протекающие в элементе, степень их детализации, физические переменные, участвующие в описании физического процесса при различных степенях его детализации, а также задаёт математическое описание процессов в объекте и законов его функционирования, использование ограничений, математических соотношений в соответствии с их физическим смыслом. Содержит следующие *субаспекты*: математический, геометрический, детализационный, объектно-параметрический, модельный.

2) *Алгоритмический аспект* определяет поведение объектов в течение времени их функционирования в задаче и информационные связи между ними, а также сценарий проведения эксперимента. Содержит следующие *субаспекты*: поведенческий, исследовательский.

3) *Компонентный аспект* задаёт соответствие между элементами формализованного представления задачи (её математической моделью) и их компонентными отображениями в рамках формализма ММКЦ. Содержит следующие *субаспекты*: декомпозиционный, лексический, топологический.

Методика многоаспектного анализа ФТЗ заключается в построении информационной модели ФТЗ в соответствии с вышеописанными аспектами.

**В параграфе 2.2 «Моделирование дискретного поведения физико-технических задач»** рассматриваются традиционные подходы к моделированию дискретно-непрерывных систем (конечные автоматы, диаграммы состояний *UML*, гибридные автоматы), описывается предлагаемый подход – интерпретация диаграмм состояний в язык ММКЦ.

Базовыми элементами дискретного поведения объектов в ФТЗ являются 1) «состояние», характеризующееся наличием одновременного непрерывного поведения и 2) «событие», характеризующееся мгновенными качественными или количественными изменениями во всей модели задачи или её части.

Диаграммы состояний языка ММКЦ представляют собой кортеж  $SD = (S, T, P(V), R, D)$ , где  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  – множество дискретных состояний (соответствующее вершинам графа дискретного поведения),  $T = \{(S_1, S_2), (S_2, S_3), \dots\}$ ,  $T \subseteq S \times S$  – множество дискретных переходов (соответствующих ветвям графа – отношению, заданному на множестве  $S$ ),  $P(V)$  – множество предикатов, инициирующих дискретный переход,  $R \subseteq S \times D \times C$ ,  $R = S \rightarrow C$  – соответствие из множества состояний во множество компонентов модели, определяющее для каждого его дискретного состояния одну или несколько математических моделей непрерывного поведения,  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  – множество компонентов модели, представляющих математическую модель объекта,  $D$  – множество параметров модели, принятых за инварианты во время состояния  $S_i$  и передаваемых на вход компонентам  $C_j$ .

Диаграммы состояний располагаются на L-слое и являются управляющими конструкциями для КЦ C-слоя, описывающих непрерывное поведение системы, которое может задаваться: 1) схмотехническими моделями, состоящими из блоков низкого уровня абстракции; 2) структурными (физическими) моделями, состоящими из блоков более высокого уровня

абстракции; 3) аналитическими моделями, которые задаются в блочно-символьном виде (с помощью интерактивных математических панелей) системами алгебро-дифференциальных уравнений. Так, дискретное состояние определяет не только количественный (значение параметров одной аналитической модели) аспект в поведении объекта, но и качественный (переключение на другую аналитическую модель или изменение структуры компонентной модели, например, за счёт переключения ключей/клапанов).

На рис. 3 представлен пример компонентной схемы дискретного поведения отскакивающего от поверхности земли упругого тела как задачи, традиционно используемой для иллюстрации гибридного поведения. Как видно из схемы, моделирование дискретной составляющей гибридного поведения осуществлено с помощью КЦ «Start – 1. Полёт – 2. Отскок – Конец», соответствующей фазам движения: полёт (состояние) и отскок (событие).

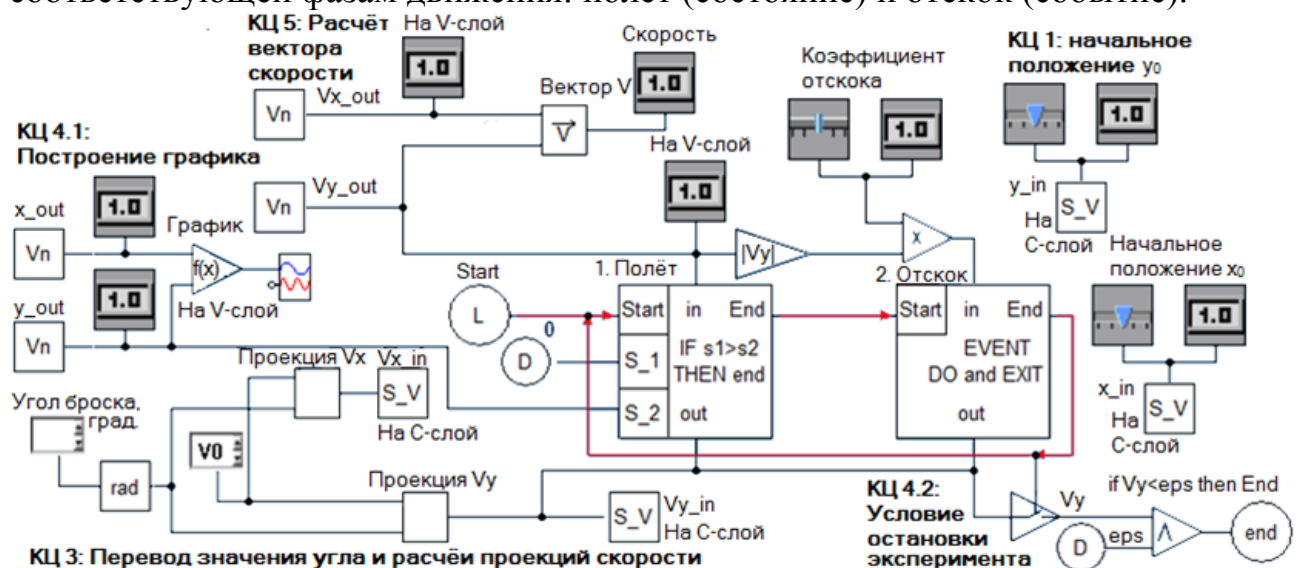


Рисунок 3 – Алгоритмическая компонентная цепь задачи

Основные отличия предлагаемых диаграмм состояний языка МАК от гибридных автоматов, применяемых для моделирования гибридных (дискретно-непрерывных) систем, заключается в следующем: 1) в теории гибридных автоматов непрерывное состояние «интегрировано» в дискретное, в то время как диаграммы состояний языка МАК представляют собой управляющую конструкцию  $L$ -слоя, которая надстраивается над одной или несколькими компонентными моделями  $C$ -слоя; 2) диаграммы состояний языка МАК могут сочетаться со структурно-функциональными блоками  $C$ -слоя (например, бак, труба и пр., а не только с моделями, представленными в символьном виде); 3) диаграммы состояний как элемент языка МАК могут сочетаться с его другими элементами (например, с сетями Петри); 4) диаграммы состояний могут использоваться в качестве управляющей надстройки не только для компонентов  $C$ -слоя (интерактивные математические панели, структурно-функциональные блоки), но и для компонентов  $L$ -слоя (запись/чтение из файлов, баз данных и пр.).

В разработанных диаграммах реализован механизм *компенсации амплитудно-временной погрешности*, накапливающейся при смене состояний объекта с гибридным поведением. Данная погрешность при однократной смене поведения не превышает допустимой погрешности модели, однако при

многократных переходах накапливается и значительно её превышает. Такая накапливаемая погрешность характерна для любых дискретно-непрерывных моделей и наблюдается во всех средах моделирования. Для наглядности проиллюстрируем это явление на модели отскакивающего от поверхности земли упругого тела. На рис. 4 представлен график траектории движения. Условие смены состояния –  $y(i) < 0$  при  $V_y(i) < 0$ .

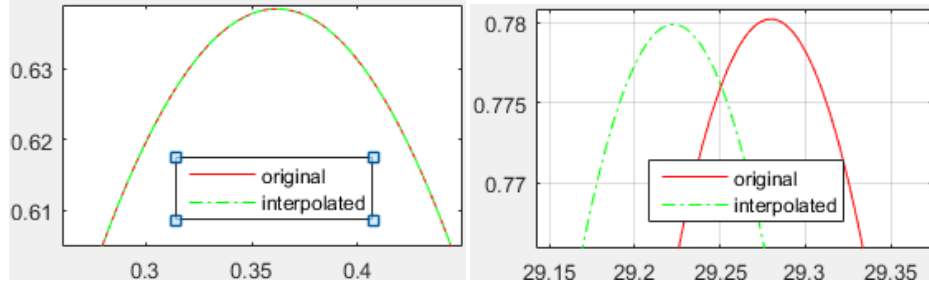


Рисунок 4 – Иллюстрация накопления погрешности при  $dt = 0.001$  с

Как видно из рисунка 4, с ростом числа итераций работы дискретной модели разница между зависимостями увеличивается, при этом необходимо отметить не только разность значений по оси ОУ ( $\Delta y(t)$ ), но и возрастающее смещение по оси ОХ (смещение по времени  $\Delta t(y)$ ), которые накладываются друг на друга, образуя описываемую погрешность (рис. 5).

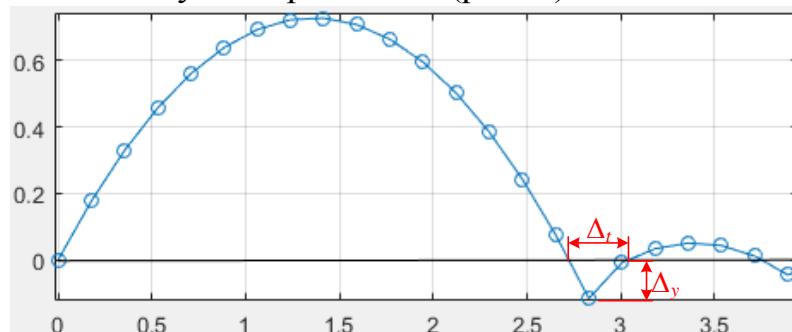


Рисунок 5 – Траектория движения тела при шаге  $dt = 0.05$  с

Для устранения данной погрешности реализован механизм решения задачи обратной интерполяции в момент срабатывания условия – смещение непрерывного состояния модели (всех переменных модели) в точку фазового пространства  $y=0$  с применением интерполяционной формулы Лагранжа.

Алгоритм компенсации амплитудно-временной погрешности подразумевает следующие опциональные варианты продолжения расчётов модели (рис. 6): а) продолжение расчёта по смещённой сетке (после однократного изменения шага интегрирования) с прежним шагом  $dt$  (параметры *reCompute*, *goBack* алгоритма равны 0); б) расчёт следующей итерации в узле старой сетки с сохранением значений в промежуточном узле (*goBack* = 0, *reCompute* = 1), в таком случае имеем смешанную сетку с переменным шагом вокруг узлов срабатывания переходов из одного дискретного состояния в другое; в) расчёт следующей итерации работы модели с дальнейшей заменой (перерасчётом) вектора решения в смещённом узле с целью возврата к исходной расчетной сетке (*goBack* = 1, *reCompute* = 1), в этом случае новая расчётная сетка в точности идентична оригинальной – однако значения вектора решения модели в этих узлах пересчитаны.

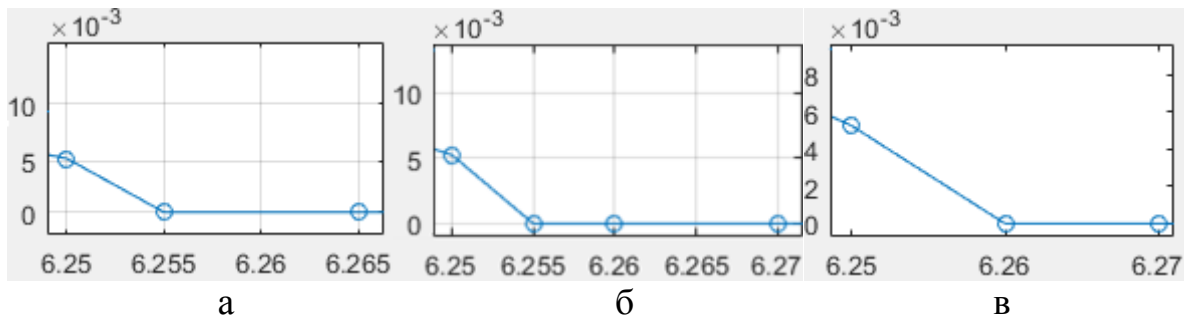


Рисунок 6 – Смещение расчётной сетки при компенсации погрешности  
 а – новая сетка, б – смешанная сетка, в – исходная сетка

Представим алгоритм компенсации амплитудно-временной погрешности (рис. 7).

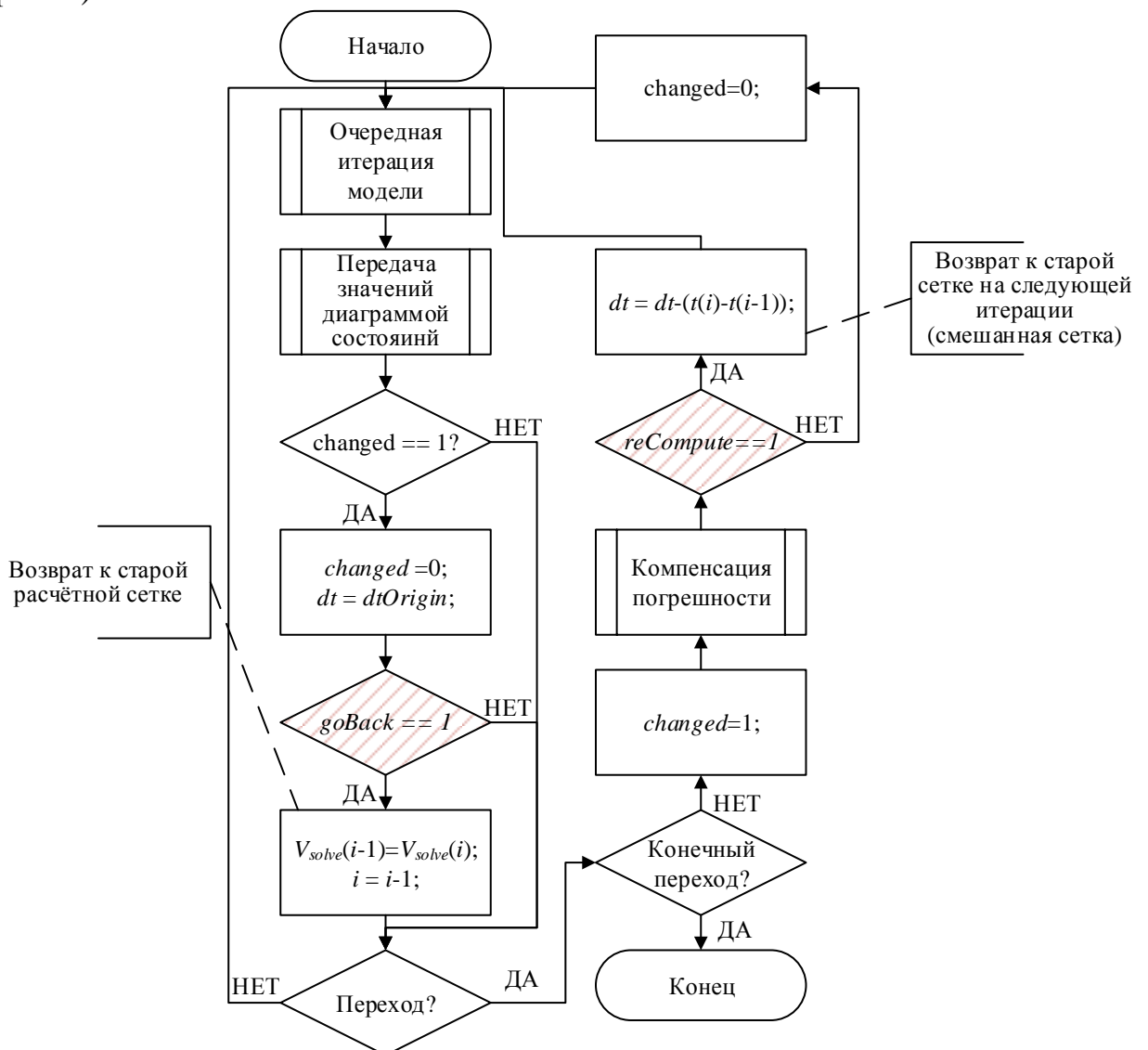


Рисунок 7 – Алгоритм компенсации амплитудно-временной погрешности

**В параграфе 2.3 «Моделирование непрерывного поведения физико-технических задач»** предлагается подход к отображению физических свойств объектов и геометрических свойств их межобъектных связей в многоуровневых компьютерных моделях ФТЗ.

Проводится анализ способов отображения геометрических свойств межобъектных связей в компьютерных моделях различных инструментальных

средств и предлагается новый подход для многоуровневых компьютерных моделей. Подходы к отображению геометрических свойств, реализованные в современных СМ, имеют следующие недостатки: 1) модель непрерывного поведения (физико-математическая составляющая задачи) и модель дискретного поведения (сценарий проведения эксперимента и алгоритм поведения объектов) находятся на одной схеме; 2) геометрические свойства либо инкапсулированы в компонент-объект (*Simulink*), либо задаются в символьной форме (*Rand Model Designer*); 3) схема компонентой модели в рассмотренных средах не отвечает концепции «физического» моделирования и визуально не соответствует структурной схеме реального объекта.

В качестве комплекса инструментов для моделирования пространственно-геометрической составляющей ФЗ и ФТЗ предлагается разработка библиотеки моделей геометрических компонентов следующих типов: 1) *геометрические примитивы* (отрезок, треугольник, четырёхугольник и пр.) – набор базовых геометрических фигур, лежащий в основе всех графических построений и предназначенный для расчёта их характеристик; 2) *геометрические преобразователи*, предназначенные для расчёта проекций вектора на плоскость, расчёта вектора по его проекциям и пр.; 3) *геометрические решатели*, предназначенные для решения базовых геометрических задач (поиск точки пересечения фигур, оценка факта попадания точки в фигуру); 4) *кривые* – для расчёта профилей поверхностей, определения траекторий движения и т.д., задаваемых уравнениями кривых различных порядков или дискретным набором точек (табличной функцией).

Разработанные геометрические компоненты позволяют упростить процедуру моделирования физико-геометрических задач, повысить наглядность моделей и повысить скорость и точность их расчёта за счёт предварительного разрешения части уравнений модели имитационным ядром и, как следствие, снижения размерности модели, разрешаемой вычислительным ядром.

Для отображения физических свойств объектов в компьютерных моделях ФТЗ были разработаны следующие компоненты СМ МАРС: 1) источники физических величин; 2) модели физических тел; 3) физические эффекты. Данные компоненты позволяют представлять компьютерные модели непрерывного (физического) поведения объектов в виде цепи связанных компонентов, непосредственно соответствующих взаимодействующим в задаче объектам, например, «твёрдое тело – атмосфера» или «твёрдое тело – поверхность».

В работе проводится анализ существующих подходов к аппроксимации табличных данных и даётся описание *метода аппроксимации на базе поисковых методов оптимизации*. В качестве критерия качества приближения предлагается использовать среднеквадратичное отклонение в узлах табличной функции. В результате получаем задачу многомерной оптимизации целевой функции

$f(x, a, b, c)$  по критерию  $\sqrt{\sum_i (y_{табл_i} - f(x_i, a, b, c))^2} \rightarrow \min$  (где  $x_i$  – аргументы табличной функции;  $a, b, c$  – параметры приближающей функции), для решения которой используется модификация метода покоординатного спуска,

предполагающая применение метода золотого сечения для оптимизации функции одной переменной на каждой оси поочерёдно. Метод покоординатного спуска является простым неградиентным методом локальной оптимизации, метод золотого сечения также не требует информации о производной оптимизируемой функции и имеет более высокую сходимость по сравнению с аналогичными методами. Начальное приближение для определения начальной точки покоординатного спуска и интервала поиска минимального значения функции по одной из координат определяется методом сеток с некоторым фиксированным шагом. Комбинация методов локальной оптимизации позволяет решить задачу глобальной оптимизации целевой функции  $f(x, a, b, c)$ .

Представим алгоритм численной аппроксимации (рис. 8).

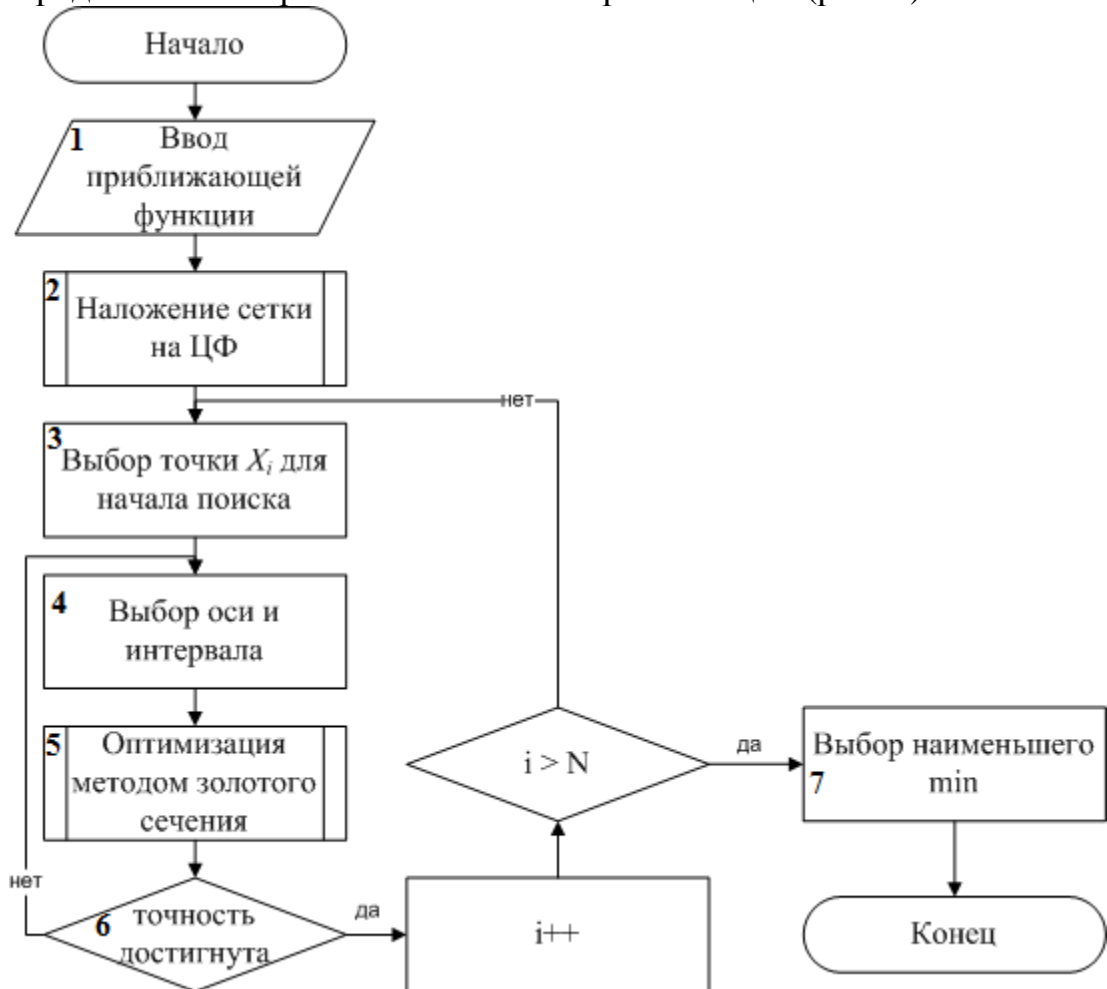


Рисунок 8 – Алгоритм численной аппроксимации

На этапе 3 осуществляется выбор нескольких точек для последовательного поиска минимума из каждой. Все найденные на этапе 6 локальные минимумы также могут быть проверены на устойчивость путём исследования их окрестностей. Вследствие этого представляется возможным найти не только глобальный, но и наиболее устойчивый из нескольких локальных минимумов.

Сравнение результатов работы метода представлено в табл. 1. В качестве аппроксимируемой функции взята траектории полёта тела в атмосфере с шагом  $\Delta t=0.1$  при начальной скорости  $v_0=50$  м/с, массе  $m=10$  кг, углом полёта  $\alpha=45^\circ$  и силе атмосферного сопротивления  $F_a$  пропорциональной скорости тела  $v$  (имеем 697 узлов табличной функции). В качестве приближающей функции выбрана

квадратичная функция  $f(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ . Для решения СЛАУ в методе наименьших квадратов (МНК) использован метод Гаусса.

Таблица 1 – Сравнение результатов аппроксимации

Метод	Коэффициенты приближающей функции			Средне-квадратичное отклонение
	a	b	c	
МНК	-0.00473	1.07290	-1.36893	0.50734
Численная аппроксимация	-0.00473	1.07260	-1.35730	0.50753
$\delta$	0.0279%	0.0281%	0.8497%	0.0373%

Таким образом, при заданных условиях описываемый метод аппроксимации обеспечивает точность, сравнимую с точностью метода наименьших квадратов. При этом применение данного метода не ограничивает пользователя списком встроенных аппроксимирующих функций – пользователь может сам ввести требуемую функцию (в аналитическом виде в интерактивную математическую панель). Также предложенный метод (в отличие от других методов оптимизации, например, метода Левенберга-Марквардта) является значительно менее чувствительным к выбору начального приближения коэффициентов аппроксимирующей функции и обеспечивает выбор наименьшего значения *min* из ряда локальных минимумов.

В главе 3 «Комплекс программ для компьютерного моделирования физико-технических задач» описывается комплекс разработанных программ для моделирования ФТЗ и обучения их компьютерному моделированию. Структурная схема комплекса представлена на рис. 9 (заштрихованы блоки, разработанные в рамках данного исследования).

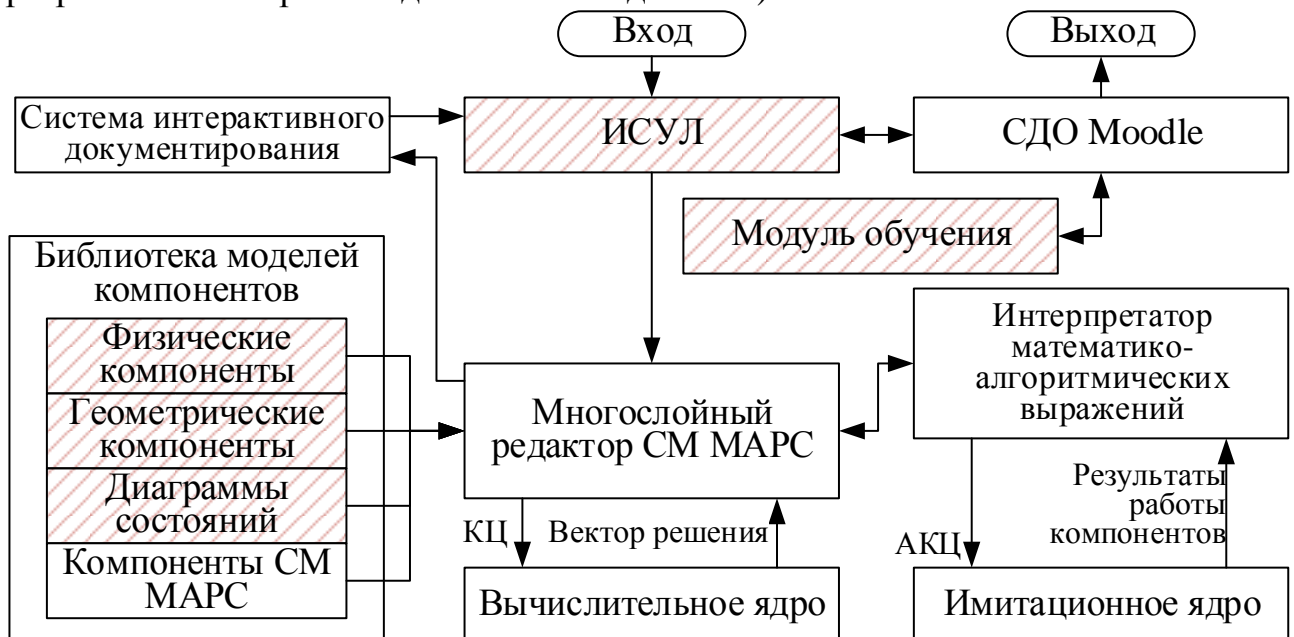


Рисунок 9 – Структура комплекса программ

Комплекс программ включает в себя:

- 1) «Библиотеку моделей компонентов для многоуровневого



компьютерного моделирования физико-технических задач в среде моделирования МАРС», предназначенную для компонентного моделирования ФТЗ в СМ МАРС. В библиотеку включены компоненты для моделирования гибридного поведения с помощью диаграмм состояний, компоненты, отображающие физические свойства объектов и геометрические свойства их связей в ФТЗ;

2) «Программный модуль для обучения компьютерному моделированию физико-технических задач», предназначенный для сопровождения внеаудиторной самостоятельной работы студентов, направленной на развитие навыков анализа и моделирования задач. Сопровождение состоит в формировании текстовых справочных инструкций обучающемуся для создания компьютерной модели задачи, условия которой введены в программу (режим иллюстрации), и проверки правильности анализа задачи в вопросно-ответной форме (режим проверки). В режиме иллюстрации программа осуществляет автоматический анализ русскоязычного текста условий введённой задачи, выделяет список взаимодействующих объектов, их параметры, характер взаимодействия и другие значимые элементы. Формируемые справочные инструкции содержат указания по анализу условий задачи, выбору компонентов из библиотеки моделей компонентов и порядку построения компонентной модели. Достижение образовательного эффекта возможно благодаря сочетанию двух режимов работы модуля в качестве дополнения к аудиторной работе.

3) Информационная система управления виртуальной лабораторией (ИСУЛ) моделирования ФТЗ, предназначенная для сопровождения образовательного процесса при проведении лабораторных работ по таким дисциплинам как «Компьютерное моделирование физических задач», «Основы компьютерного моделирования физико-технических задач», «Моделирование систем». ИСУЛ представляет собой интерфейс между студентом, электронным курсом по дисциплине в *Moodle* и компьютерными моделями в СМ МАРС на локальном компьютере в учебной аудитории. ИСУЛ выполняет функции: 1) взаимодействия студента с *Moodle* (просмотр веб-страниц), 2) обмена данными с *Moodle*, 3) предварительного заполнения отчёта данными авторизованного в *Moodle* пользователя, 4) установления соответствий между элементами курса в *Moodle* (лабораторные работы) и файлами компьютерных моделей на локальном компьютере.

**В главе 4 «Примеры многоуровневого моделирования физических и физико-технических задач»** (а также в Приложении А) приводятся модели ФТЗ, построенные в СМ МАРС с применением разработанного комплекса программных инструментов, соответствующих следующим разделам: 1) непрерывные задачи, 2) дискретно-непрерывные задачи, 3) физико-геометрические задачи, 4) учебно-иллюстративные модели, 5) модели с управляющими конструкциями. На рис. 10 представлена компьютерная модель штангового глубинного насоса нефтедобывающей скважины, обладающей как структурной, так и поведенческой сложностью характерной ФТЗ.

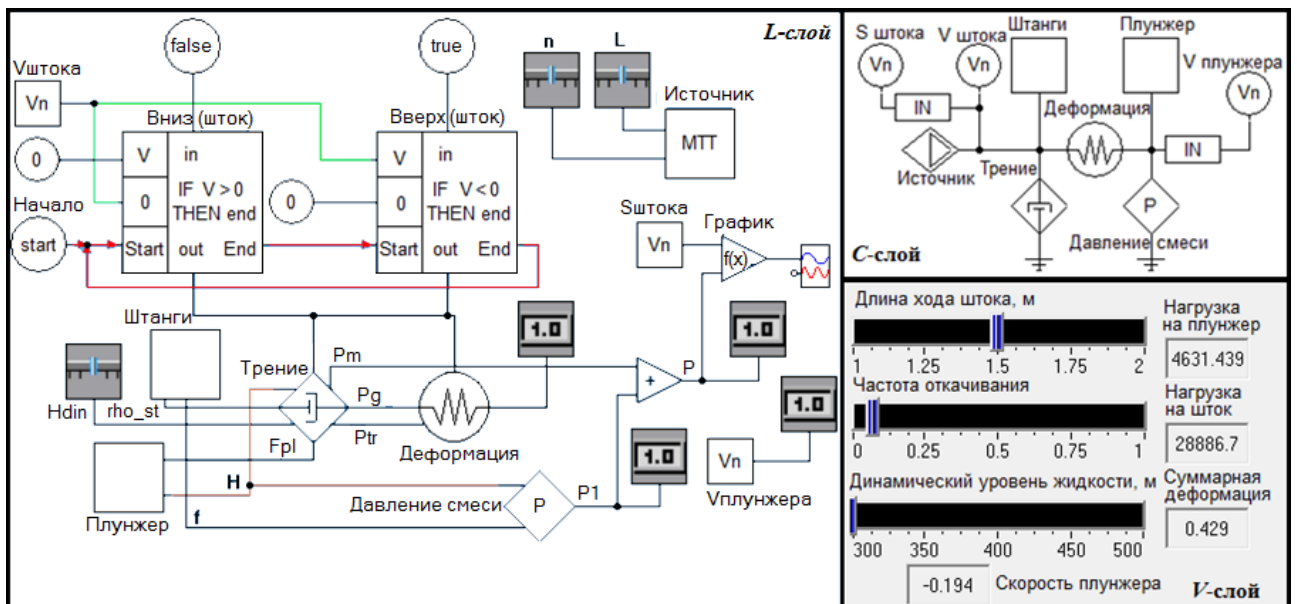


Рисунок 10 – Модель штангового глубинного насоса

На С-слое представлена непрерывная модель движения тел при воздействии сил трения и растяжения, учитывающая структурную сложность, на L-слое – дискретная модель движения, разделённая на такты, учитывающая поведенческую сложность задачи, на V-слое – визуальное представление работы модели. Как видно из рис. 10, реализация данной задачи была произведена с применением стандартных компонентов одномерной механики («Источник скорости», «Растяжение», «Трение») с их параметризацией, что подтверждает тезис об универсальности разрабатываемого подхода.

**В заключении** обобщаются результаты проведённого исследования.

Выполненная диссертационная работа направлена на решение научно-технической задачи создания методики, алгоритма, эффективных и адекватных инструментальных средств компьютерного моделирования ФТЗ, позволяющих строить их многоуровневые (с отделением модели непрерывного поведения объекта от алгоритма его дискретного поведения) модели задач из блоков высокого уровня абстракции с понижением погрешности моделей. Также в данной работе закладываются основы исследования возможностей автоматизированной формализации словесного портрета ФТЗ, конечной целью которого является автоматизированное построение (с частичным участием пользователя) компьютерных моделей процессов в задачах физики и техники.

В ходе проведённого исследования получены следующие результаты:

1. Описан и классифицирован класс ФТЗ как объекта моделирования.
2. Разработан алгоритм многоуровневого компьютерного моделирования ФТЗ, включающий этапы формализации моделируемой задачи и её многоуровневой декомпозиции на объектный, логический (алгоритмический) и визуальный уровни с применением методики многоаспектного анализа.

3. Разработаны средства моделирования физических свойств объектов, геометрических свойств их связей в ФТЗ, а также инструменты для моделирования дискретно-непрерывного (гибридного) поведения объектов с реализацией механизма компенсации накапливаемой амплитудно-временной погрешности.

4. Разработанный численный метод аппроксимации на базе поисковых методов оптимизации позволяет аппроксимировать табличные результаты моделирования ФТЗ приближающими функциями произвольного вида, обеспечивая выбор глобального минимума отклонения значений приближающей функции от аппроксимируемой из ряда локальных минимумов.

5. Разработан комплекс программ, включающий в себя библиотеку моделей компонентов для многоуровневого моделирования ФТЗ на базе СМ МАРС, программный модуль для самостоятельного обучения студентов моделированию ФТЗ и информационная система для организации взаимодействия студентов с виртуальной лабораторией моделирования ФТЗ во время проведения аудиторных лабораторных работ.

6. Разработанный алгоритм формализации словесного портрета ФТЗ, используемый в программном модуле обучения моделированию ФТЗ, позволяет проводить автоматический анализ текстовых условий задач с целью их перевода на формальный язык (в соответствии с формализмом ММКЦ) для иллюстрации пользователю процедуры анализа и многоуровневой декомпозиции задачи, что позволяет дополнять аудиторную работу студента по дисциплинам, связанным с моделированием, автономной самостоятельной работой, направленной на закрепление навыков анализа задач.

7. Построенная многоуровневая компьютерная модель штангового глубинного насоса использована в АО «Энергонефтемаш» для определения оптимальных эксплуатационных характеристик нефтедобывающей установки и построения алгоритма работы системы управления штанговым глубинным насосом, другие модели использованы в образовательном процессе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

## ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах из перечня ВАК

1. **Кочергин М.И.** Формализация текстовых условий задач по физике / М.И. Кочергин, К.С. Кочергина // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 65–68.

2. **Kochergin M.I.** Interpretation of the statechart diagram into a multilevel simulation language / M.I. Kochergin // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20. – № 4. – С. 122–125. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-122-125.

3. Панов С.А. Разработка программных средств автоматической параметризации компьютерных моделей эколого-экономических систем предприятий нефтегазовой промышленности / С.А. Панов, Т.Е. Григорьева, **М.И. Кочергин** // Вестник РФФИ. – 2018. – № 4 (100). – С. 52-57.

### Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660693. Библиотека моделей компонентов для многоуровневого компьютерного моделирования физико-технических задач в среде моделирования МАРС / **Кочергин М.И.** – 12.08.2019. – М.: Роспатент, 2019. –

Бюл. 8.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660759. Программный модуль для обучения компьютерному моделированию физико-технических задач / **Кочергин М.И.** – 13.08.2019. – М.: Роспатент, 2019. – Бюл. 8.

#### **Доклады в трудах отечественных конференций**

6. **Кочергин М.И.** Моделирование логико-лингвистических конструкций для формализации описания объекта моделирования / М.И. Кочергин, К.С. Спиридонова // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов IX Международной научно-практической конференции (30–31 октября 2013 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2013. – Ч. 2. – С. 110–114.

7. **Кочергин М.И.** Моделирование логико-лингвистических конструкций для формализации текста задачи по физике / М.И. Кочергин // Современное образование: актуальные проблемы профессиональной подготовки и партнерства с работодателем: Материалы междунар. науч.-метод. конф., 30–31 января 2014 г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – С. 82–83.

8. **Кочергин М.И.** Схема автоматизированной формализации физических задач на основе метода компонентных цепей / М.И. Кочергин, Т.В. Ганджа // Перспективы развития фундаментальных наук: Труды XI Междунар. конф. студентов и молодых учёных. Россия, Томск, 22–25 апреля 2014 г. – Томск: Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, 2014. – С. 1044–1047.

9. **Кочергин М.И.** Обучение решению задач по физике в среде компьютерного моделирования задач при использовании системы автоматического анализа текстов / М.И. Кочергин // Научная сессия ТУСУР–2014: Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 14–16 мая 2014 г.: в 5 частях. – Томск: В-Спектр, 2014. – Ч. 2. – С. 247–249.

10. **Кочергин М.И.** Особенности модуля автоматического анализа в системе логико-лингвистического анализа текстов задач по физике / М.И. Кочергин, К.С. Спиридонова // Научная сессия ТУСУР–2014: Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 14–16 мая 2014 г.: в 5 частях. – Томск: В-Спектр, 2014. – Ч. 2. – С. 257–260.

11. **Кочергин М.И.** Обучение решению задач методом моделирования / М.И. Кочергин // Современное образование: практико-ориентированные технологии подготовки инженерных кадров: Материалы междунар. науч.-метод. конф., 29–30 января 2015 г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – С. 46–47.

12. Дмитриев В.М. Многоуровневое моделирование задач физики В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, **М.И. Кочергин** // Современное образование: практико-ориентированные технологии подготовки инженерных кадров: Материалы междунар. науч.-метод. конф., 29–30 января 2015 г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – С. 47–

49.

13. **Кочергин М.И.** Система обучения решению задач по физике методом моделирования / М.И. Кочергин // Перспективы развития фундаментальных наук: Труды XII Междунар. конф. студентов и молодых учёных (Томск, 21–24 апреля 2015 г.). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 1500–1502.

14. **Кочергин М.И.** Система интеллектуальной поддержки процесса решения задач по физике методом моделирования / М.И. Кочергин // Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР–2015»: Томск, 13–15 мая 2015 г.: в 5 частях. – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 5. – С. 309–312.

15. Дмитриев В.М. Интерпретация гибридных моделей в многоуровневую компьютерную модель / В.М. Дмитриев, **М.И. Кочергин** // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения: материалы региональной науч.-прак. конф., Томск, 2015. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – С. 331–334.

16. **Кочергин М.И.** Моделирование экземпляров предметной области посредством формализации их текстовых описаний / М.И. Кочергин // Перспективы развития фундаментальных наук: Труды XIII Междунар. конф. студентов и молодых учёных. Россия, Томск, 26–29 апреля 2016 г. – Томск: Изд-во – Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – Том 7. IT-технологии и электроника. – С. 81–83.

17. **Кочергин М.И.** Система обучения компьютерному моделированию задач по физике // М.И. Кочергин / Научная сессия ТУСУР–2016: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 25–27 мая 2016 г.: в 6 частях. – Томск: В-Спектр, 2016. – Ч. 3. – С. 108–111.

18. **Kochergin M.I.** Automated Training System for Modeling Physics Problems /M.I. Kochergin // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XII Междунар. науч.-практ. конф. (16–18 ноября 2016 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2016. – Ч. 2. – С. 211–213.

19. **Кочергин М.И.** Построение учебно-иллюстративной модели динамической системы (на примере физического маятника) / М.И. Кочергин // Современное образование: развитие технологий и содержания высшего профессионального образования как условие повышения качества подготовки выпускников: Материалы междунар. науч.-метод. конф., 26–27 января 2017 г., Россия, Томск. – Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2017. – С. 112–114.

20. **Кочергин М.И.** Применение логической модели знаний для классификации физического поведения объектов / М.И. Кочергин // Перспективы развития фундаментальных наук: Сб. трудов XIV Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Россия, Томск, 25–28 апреля 2017 г. – Томск: Изд-во – Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, 2017. – С. 63–65.

21. **Кочергин М.И.** Обзор инструментов для компьютерного моделирования физических процессов / М.И. Кочергин // Научная сессия ТУСУР–2017: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и

молодых учёных, посвящённой 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 частях. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 4. – С. 96–99.

22. **Kochergin M.I.** Formalization of low structured physics and technics problems for computer modeling and simulation / M.I. Kochergin // Научная сессия ТУСУР–2017: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 частях. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 8. – С. 185–187.

23. **Кочергин М.И.** Применение интерактивных математических панелей для моделирования физических задач в рамках среды многоуровневого моделирования / М.И. Кочергин // Моделирование. Фундаментальные исследования, теория, методы и средства: Материалы 17-ой Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 26–27 сент. 2017г. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 54-59.

24. **Кочергин М.И.** Иллюстрация баланса мощности в электрических цепях в учебно-иллюстративном модуле / М.И. Кочергин, А.В. Шутенков // Моделирование. Фундаментальные исследования, теория, методы и средства: Материалы 17-ой Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 26–27 сент. 2017 г. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 50–53.

25. **Кочергин М.И.** Компьютерное моделирование полёта тела в атмосфере для образовательных целей / М.И. Кочергин // Новые информационные технологии и системы: Сб. науч. ст. XIV Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию кафедры «Вычислительная техника» и 30-летию кафедры «Системы автоматизированного проектирования» (г. Пенза, 22–24 ноября 2017 г.). – Пенза: Изд-во ПГУ, 2017. – С. 400–404.

26. **Кочергин М.И.** Учебно-иллюстративные модели физических задач в образовательном процессе / М.И. Кочергин // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XIII Междунар. науч.-практ. конф. (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 2. – С. 114–117.

27. **Кочергин М.И.** Обучение многоуровневому компьютерному моделированию физических задач: статические и динамические модели / М.И. Кочергин // Современное образование: повышение профессиональной компетентности преподавателей вуза – гарантия обеспечения качества образования: Материалы междунар. науч.-метод. конф., 1–2 февраля 2018 г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – С. 167–169.

28. **Кочергин М.И.** Численная аппроксимация табличных функций на основе методов многомерной оптимизации при моделировании физико-технических задач / М.И. Кочергин // Перспективы развития фундаментальных наук: Сб. трудов XV Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 24–27 апреля 2018 г.): в 7 т. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2018. – Т. 3: Математика. – С. 58-60.

29. **Кочергин М.И.** Алгоритм решения задачи аппроксимации через задачу многомерной оптимизации / М.И. Кочергин // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 3. – С. 92–95.

30. **Kochergin M.I.** Numerical approximation of table functions based on

multidimensional optimization methods / М.И. Kochergin // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 3. – С. 242–245.

31. **Кочергин М.И.** Система управления лабораторией «Элементы и устройства роботизированных систем» / М.И. Кочергин, В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР (Томск, 22–24 мая 2019 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 2. – С. 23–25.

32. **Кочергин М.И.** Отображение геометрических свойств объектов в многоуровневых компьютерных моделях / М.И. Кочергин // Перспективы развития фундаментальных наук: Сб. трудов XVI Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 23-26 апреля 2019 г.): в 7 томах. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – Том 7. IT-технологии и электроника. – С. 89-91.

#### **Тезисы в трудах отечественной конференции**

33. **Кочергин М.И.** Автоматический анализ текстов задач по физике для сопровождения процесса их решения в среде компьютерного моделирования задач [Электронный ресурс] / М.И. Кочергин // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ–2014» / Отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, М.В. Чистякова – М.: МАКС Пресс, 2014. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). – URL: [http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov\\_2014/2609/2200\\_74450\\_c2ef12.pdf](http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2014/2609/2200_74450_c2ef12.pdf).

34. **Кочергин М.И.** Применение объектно-ориентированного подхода при компьютерном моделировании задач физики / М.И. Кочергин // Материалы 55-й Международной научной студенческой конференции: Информационные технологии. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. – С. 69.