



РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОГРАММАМ СО РАН

В 2007 году выполнялись исследования по 5 проектам приоритетных направлений фундаментальных исследований по программам СО РАН на 2007–2009 гг.

1. Математическая физика, математические проблемы механики, физики и астрономии.

Программа 1.2.1. Теория дифференциальных уравнений и математическая физика.

Проект 1.2.1.4. Качественный анализ эволюционных уравнений и систем управления.

№ гос. регистрации: 01.2.007 08579

Научный руководитель – чл.-к. РАН А.А. Толстоногов.

Исследованы управляемые системы с зависящими от времени субдифференциальными операторами и возмущениями монотонного типа при невыпуклых ограничениях на управления. Субдифференциальные операторы, возмущения, ограничения на управление и начальные условия зависят от параметра. Исследована зависимость решений таких систем от параметра. В качестве приложения рассмотрена управляемая система параболического типа, правая часть которой содержит p -лапласиан и субдифференциалы индикаторных функций выпуклых, замкнутых множеств, являющихся значениями зависящей от времени многозначной функции. Показано, что предел последовательности решений этой системы при $p \rightarrow \infty$ является решением управляемой системы, описываемой обыкновенным дифференциальным уравнением, вид которого установлен.

Исследованы качественные свойства решений дифференциальных включений с обобщенными функциями и систем управления с разрывными и обобщенными функциями в правых частях, обоснована корректность аппроксимации им-



пульсными системами обычных управляемых систем с ограниченными на малых промежутках времени управлениями.

Решена задача о стабилизации механической системы релейными управлениями для целевого множества, описываемого разрывными по времени функциями. В основу положен принцип декомпозиции управления. Это приводит к движению системы с кусочно-непрерывными скоростями, которые являются решениями некоторой непрерывно-дискретной системы с позиционными и импульсными управлениями. Позиционное управление (обычная функция) обеспечивает стабилизацию движения по целевому множеству между моментами приложения импульсов. Предложенный подход позволил впервые решить задачу слежения (движение по наперед заданной траектории) и задачу управляемости (перевод системы из одного обобщенного состояния в другое) одновременно в скользящем режиме, минуя переходные процессы. Импульсы меняют обобщенные скорости движения по выбранной в пространстве обобщенных состояний траектории скачкообразно, в частности, могут обратить их в нуль, и тогда позиционное управление стабилизирует конечное состояние системы. Полученные результаты применены для анализа динамики звена манипуляционного робота с минимальным расходом энергии.

Доказаны теоремы об устойчивости и асимптотической устойчивости функционально-дифференциальных включений с использованием инвариантно дифференцируемых функционалов Ляпунова.

Исследованы условия существования полиномиальных квазирешений начальной задачи для линейных дифференциально-разностных уравнений с различными отклонениями аргумента, а также для линейных дифференциально-разностных уравнений смешанного типа. Изучены многоточечные краевые задачи для дифференциально-разностных уравнений запаздывающего и нейтрального типов, указаны условия разрешимости краевых задач. Для указанных задач разработаны численные алгоритмы и проведены численные эксперименты, которые показали применимость и эффективность предложенных методов.



Доказано существование и изучены свойства решений эволюционных систем с зависящими от времени субдифференциальными операторами и возмущениями монотонного типа при невыпуклых ограничениях. Исследована зависимость решений от параметра и изучены задачи минимизации интегральных функционалов с невыпуклыми интегрантами на решениях, указанных выше систем.

Проведен анализ разрывных систем в форме дифференциальных включений с обобщенными функциями, входящими в виде слагаемых. Исследована устойчивость функционально-дифференциальных включений. Рассмотрены задачи слежения, управляемости и стабилизации для механических систем с использованием разрывных обратных связей с импульсными составляющими. Изучены качественные свойства и структуры решений импульсно разрывных систем и систем при наличии последствия.

Исследована устойчивость нетривиальных относительных равновесий гиростата с однородным упругим стержнем в центральном ньютоновском поле сил. Проведена классификация относительных равновесий гиростатов в прямой постановке.

Изучена обратная вариационная начальная задача для линейных дифференциально-разностных уравнений опережающего типа в постановках задачи идентификации и задачи управления по начальной функции. Исследована многоточечная краевая задача для линейных дифференциально-разностных уравнений смешанного типа. Построены полиномиальные квазирешения для систем функционально-дифференциальных уравнений запаздывающего и нейтральных типов.

На основе теории монотонных операторов в частично упорядоченных пространствах и в сочетании с техникой верхних и нижних решений изучены свойства стационарных решений начально-краевой задачи для вырождающегося параболического уравнения второго порядка, содержащего интегральные операторы. В частности, исследована задача о стабилизации нестационарных решений начально-краевой задачи к соответствующим стационарным решениям краевой задачи для равномерно эллиптического уравнения с нелокальными операторами. Доказа-



но, что верхнее и нижнее квазирешения нелинейной краевой задачи определяют в пространстве начальных данных область притяжения, которая конструктивно построена. Предложен итерационный метод построения решения, позволяющий оценивать погрешность приближения.

Получены теоремы существования решений предельной задачи магнитной изоляции с ионным фоном. Развита техника нижних-верхних решений для сингулярных краевых задач без условия квазимонотонности. Построены численные алгоритмы решения предельной задачи с учетом ионного фона. Показано, что в режиме, близком к режиму “насыщения”, решение становится неединственным, что ведет к явлению периодической бифуркации (бифуркации Хопфа) для смешанных гамильтоново-потенциальных сингулярных систем. Построены соответствующие бифуркационные диаграммы для двух параметров. Изучены явления перехода режима “насыщения” к хаосу.

Найдены новые точные решения неавтономного уравнения Лиувилля с волновым и эллиптическим оператором. Указаны преобразования эквивалентности для неавтономного эллиптического уравнения Лиувилля.

В рамках квазиклассического приближения построена общая теория процессов рассеяния мягких (анти) кварковых возбуждений на жестких термальных частицах горячей КХД среды.

Проведен анализ процесса тормозного излучения мягких ферми возбуждений в горячей неабелевой плазме.

Построены бесконечные классы ограничений, совместные с цепочками Боявленского. Исследованы свойства интегрируемости по Лиувиллю (первые интегралы), структура решений и группы преобразований Беклунда для присоединенных систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Разработаны методы и алгоритмы тензорной (векторной) томографии.



2. Теория систем; общая теория управления сложными техническими и другими динамическими системами, в том числе единая теория управления, вычислений и сетевых связей; теория сложных информационно-управляющих систем; групповое управление; распределенное управление.

Программа 3.10.1. Математическая теория управления при возмущениях и неопределенности.

Проект 3.10.1.1. Устойчивость и управление непрерывно-дискретными и другими гетерогенными динамическими системами.

№ гос. регистрации: 01.2.007 11727

Научный руководитель – академик РАН С.Н. Васильев.

Получены обоснования новых уточненных процедур построения гетерогенных моделей сравнения для исследования методом редукции с функциями Ляпунова в виде “векторных норм” динамических свойств типа устойчивости, ограниченности, диссипативности и инвариантности нелинейных непрерывно-дискретных управляемых динамических систем с монотонно ограниченными нелинейностями (в том числе по управлению и измерениям) и неопределенностями.

Предложен основанный на декомпозиции и методе редукции с сублинейными вектор-функциями Ляпунова (ВФЛ) подход к строгому анализу робастной устойчивости и диссипативности составных гетерогенных систем стабилизации нелинейных непрерывных объектов с распределенным (децентрализованным) дискретным управлением при многократном асинхронном квантовании сигналов управлений и измерений.

Показана возможность использования этого подхода в новых задачах устойчивости конфигураций и построения оценок динамического качества движущихся формаций в условиях различных внутренних и внешних неопределенностей и неполноты измерений параметров собственного и взаимного движения агентов.



Доказана сходимость семейства траекторий вычисляемых по прямому алгоритму построения программного управления, обеспечивающего движение объекта в некоторой фиксированной (определяемой требуемой точностью исполнения) окрестности заданного маршрута и параметризованных произвольными (в отличие от рассмотренного ранее случая с эквидистантными) возмущенными разбиениями опорного разбиения, моделирующими ошибки введения данных в расчет. Получены новые модификации этого алгоритма для нелинейных систем с управлением, расширяющие область приложений прямого метода. Первая модификация является улучшением разработанного ранее алгоритма, обеспечивающего расчет непрерывных управлений, и позволяет вычислять гладкие управления; вторая модификация алгоритма основана на коррекции (перестройке) подпространств управляемости объекта на каждом шаге итерационного процесса расчета программного управления по результатам предыдущей итерации. Новая версия алгоритма, по существу являющаяся адаптивным алгоритмом, позволяет сократить число итераций и обеспечить расчет управлений при более жестких ограничениях как на сами управления (“скорости прокачки” гироскопов), так и на часть фазовых переменных объекта управления (на его угловые скорости). Следует отметить, что обе новые версии прямого алгоритма получены, используя специфику нелинейной динамической модели объекта управления – орбитального телескопа – и гиросиловых исполнительных органов системы управления.

Для логического средства представления и обработки знаний – исчисления позитивно-образованных формул (ПО-формул) – были обоснованы корректность и полнота расширения исчисления ПО-формул с помощью введения функциональных символов. Были найдены новые алгоритмы для поиска подстановок, необходимых для применения правила вывода в новом расширенном исчислении. Новые алгоритмы позволяют значительно повысить эффективность автоматического поиска логических выводов, как в обычном, так и в новом, расширенном исчислении ПО-формул. В настоящее время ведется разработка программной системы, реализующей новые алгоритмы.



Обнаружена связь между поиском логических выводов и задачами удовлетворения ограничений (constraint satisfaction problems, CSP), а именно: при работе новых алгоритмов имеется возможность формулирования различных задач в форме задач удовлетворения ограничений и использования различных алгоритмов для решения таких задач с дальнейшим применением в поиске вывода (управлении выводом).

В рамках программного комплекса ВФЛ-РЕДУКТОР реализована процедура синтеза параметров систем управления, основанная на непрерывном варианте генетических алгоритмов, алгоритмах построения ВФЛ, систем сравнения и количественных оценок. Задача синтеза заключается в отыскании коэффициентов обратных связей (элементов матрицы обратных связей), обеспечивающих наивысшую точность функционирования системы, т.е. минимальность величин отклонений от нуля некоторых из координат вектора состояния системы, в условиях воздействия различного рода возмущений, при неопределенностях, наличии погрешностей измерений и исполнительных устройств, а также ограничений на управляющие воздействия. В качестве ограничения в получившейся задаче оптимизации используется требование устойчивости (диссипативности).

С использованием программного комплекса ВФЛ-РЕДУКТОР решена задача устойчивости и управления прямолинейно движущейся формации, состоящей из некоторого множества движущихся объектов. При этом действия одного объекта произвольны и независимы от действий остальных объектов (он называется ведущим или лидером), задача остальных объектов – пытаться сохранить заданное расстояние от себя до впереди идущего объекта. Задача решена как в непрерывном, так и в непрерывно-дискретном варианте.

Для автоматных моделей разработаны алгоритмы синтеза управлений, обеспечивающих выполнимость различных динамических свойств, например, достижимость целевого множества из некоторого множества начальных состояний, инвариантность и др.



Применен логический подход к решению задачи динамического планирования миссии автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) в условиях неопределенности. В рассмотренной постановке под миссией понимается набор исследовательских и других работ, которые необходимо выполнить в различных, несвязанных между собой, областях. Области характеризуются различными признаками. Задача планирования состоит в наиболее рациональной последовательности обхода заданных областей. При планировании миссии для оценки стоимости переходов между исследуемыми областями используется информация о внешней среде, которая накапливается в процессе функционирования АНПА и формируется по получаемым от датчиков данным. Проведены тестовые испытания в программном имитаторе подводной среды UWEM.

Получены условия асимптотической устойчивости и неустойчивости положения равновесия механической системы при нестационарном доминировании диссипативных сил (неограниченно растущий со временем коэффициент при диссипативных силах в уравнениях движения). Эти условия формулируются в виде обычных требований к потенциальной энергии и ограничений на скорость роста коэффициента при диссипативных силах.

Для неавтономных механических систем с полным набором сил получены условия экспоненциальной устойчивости положения равновесия, формулируемые в терминах границ собственных и сингулярных чисел матричных коэффициентов уравнений возмущенного движения. Предложены способы стабилизации до экспоненциальной устойчивости за счет сил иной структуры при заданных нестационарных потенциальных или неконсервативных позиционных силах.

В рамках метода Рауса–Ляпунова разработан ряд алгоритмов выделения и качественного исследования инвариантных многообразий консервативных систем. Осуществлена компьютерная реализация части полученных алгоритмов на основе средств компьютерной алгебры.



На основе полученных средств проведено качественное исследование уравнений Кирхгоффа и уравнений Эйлера на алгебрах Ли. Для спутника на круговой орбите выполнено исследование границ устойчивости.

Получены необходимые, а также достаточные условия D -устойчивости механических систем с двумя и тремя степенями свободы в зависимости от структуры сил.

Разработанное ранее программное обеспечение для исследования систем взаимосвязанных твердых тел модифицировано и адаптировано для анализа динамики механических систем большой размерности. С помощью созданного программного комплекса на базе пакета “Mathematica” символьно построена линеаризованная модель (в форме уравнений Лагранжа 2-го рода) для механической системы из 18 тел с 32 степенями свободы.

Обоснованы алгоритмы преобразования линейной нестационарной и нелинейной общего вида алгебро-дифференциальных систем к эквивалентным формам, в которых разделены “алгебраическая” и “дифференциальная” части. Эти результаты затем использованы для исследования разрешимости задач Коши; для получения результатов о существовании решения начальной задачи для вырожденной линейной гибридной системы; для исследования проблемы поиска и описания многообразий решений (гиперплоскостей в n -мерном евклидовом пространстве, которым принадлежат согласованные начальные данные).

Рассмотрено приложение теории дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ) для решения и исследования механических систем с упругими элементами. Такие ДАУ являются уравнениями Эйлера–Лагранжа, получаемыми при поиске минимума функционала полной энергии, включая энергию деформации упругих конструкций. Рассмотрен пример ДАУ 2-го порядка, возникающих при моделировании механической системы с упругим вращающимся стержнем, и проведен ряд численных экспериментов с программной реализацией разностного коллокационного метода повышенной точности.



Получены конструктивные условия приводимости нелинейных ДАУ к системе ОДУ в нормальной форме и в этих условиях обоснованы новые подходы к построению численных методов решения и исследования. Эти методы программно реализованы

Развиты принципиально новые подходы к построению разностных схем для численного решения начальных задач для жестких систем ОДУ второго порядка.

Доказана теорема о существовании единственного решения начальных задач для линейных ДАУ 2-го порядка с так называемой простой структурой. Для данного класса задач были предложены и обоснованы разностные многошаговые методы.

Предложена трехслойная разностная схема для решения линейных вырожденных гиперболических систем со вторым порядком аппроксимации, основанная на методе сплайн-коллокации. Доказана устойчивость схемы по начальным, краевым условиям и по правой части, а также ее сходимости. Разработана программа в среде Delphi 7, обеспечивающая численное решение дифференциально-алгебраических систем уравнений в частных производных трехслойным разностным методом.

Исследованы интерполяционные блочные трехстадийные многошаговые разностные схемы с выбором стартовой точки. Построены области устойчивости таких схем.

Рассмотрены линейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений с тождественно вырожденной матрицей перед производной неизвестной вектор-функции. Матрицы, задающие систему, предполагаются зависящими от параметра. Получены критерии непрерывной зависимости решений системы от параметра. На случай ДАУ обобщена теорема Левинсона об асимптотической эквивалентности решений исходной и возмущенной систем. Рассмотрено применение метода сплайн-коллокации к тождественно вырожденной краевой задаче для системы уравнений в частных производных. Предварительно вводится понятие индекса вырожденной системы, определяется признак ее гиперболичности и форму-



лируются условия разрешимости. В этих условиях обоснован метод сплайн-коллокации.

Доказана теорема о существовании и единственности решения для квазилинейных ДАУ на конечном отрезке с использованием теоремы Ла-Саля. Исследовано влияние возмущений входных данных на процессы численного решения вырожденных интегро-дифференциальных уравнений с получением соответствующих оценок погрешности.

Проект 3.10.1.2. Методы оптимального управления при структурных воздействиях и неопределенностях с приложением к техническим и социально-эколого-экономическим системам.

№ гос. регистрации: 01.2.007 08580

Научный руководитель – д.ф.-м.н. В.А. Батулин

Исследованы линейные управляемые системы с периодическими коэффициентами при ограничении на полный импульс управляющего воздействия. Изучено асимптотическое поведение областей достижимости в устойчивом и неустойчивом случаях, т.е. когда собственные числа матрицы монодромии лежат соответственно внутри и вне единичного круга комплексной плоскости. В неустойчивом случае формы множеств достижимости имеют единственную предельную точку, в устойчивом случае не только предельные формы, но и предельные множества достижимости образуют одномерный аттрактор.

Исследованы задачи оптимального управления динамическими системами с дискретно-непрерывными свойствами, т.е. дискретно-непрерывными или гибридными системами. Подобные системы возникают во многих областях приложений теории управления, включая управление механическими системами, в динамике полета, при управлении процессами обработки информации, в экономическом анализе, теории систем массового обслуживания и т.д. Специфика класса систем состоит в том, что их траектории являются разрывными функциями времени, а



моменты приложения импульсных воздействий и их интенсивность не фиксированы заранее и подлежат определению при оптимизации заданного критерия качества. Рассмотрен класс робастных дискретно-непрерывных динамических систем. В результате сингулярного пространственно-временного преобразования задача сведена к некоторой вспомогательной задаче с абсолютно непрерывными траекториями и ограниченными управлениями. Разработана численная процедура редукции задачи улучшения для дискретно-непрерывных систем к задаче улучшения для систем с ограниченными управлениями.

Исследованы свойства модифицированных алгоритмов слабого и сильного улучшения в случае аппроксимации разрешающей функции Кротова полиномами.

Исследовались задачи оптимального управления логико-динамическими системами. Логико-динамические системы представляют собой класс смешанных дискретно-непрерывных по времени динамических управляемых систем, где дискретная компонента – целочисленная функция с конечным числом скачков. На основе достаточных условий оптимальности Кротова разработаны методы последовательных улучшений первого и второго порядков. Доказана теорема о монотонном убывании последовательностей, генерируемых алгоритмами.

Предложен подход к решению проблемы автоматизации выбора оптимальных значений параметров алгоритма в задачах оптимального управления со свободным правым концом для методов сильного и слабого улучшения второго порядка (для непрерывных систем). Подход был применен к дискретным управляемым системам и позволил получить новый алгоритм последовательных улучшений, близкий по своим характеристикам к методу второго порядка и имеющий значительно меньшую трудоемкость.

Для линейных по состоянию задач оптимального управления с ограничениями-равенствами предложены методы нелокального улучшения допустимых управлений. Нелокальность улучшения управления с учетом выполнения всех терминальных ограничений обеспечивается ценой решения специальной двухточечной краевой задачи, которая существенно проще краевой задачи принципа



максимума. Получены новые необходимые условия оптимальности управления, усиливающие принцип максимума в рассматриваемом классе задач. Разработанные методы обобщены на полиномиальные по состоянию задачи оптимального управления, в том числе системы с запаздыванием.

В классе полиномиальных задач оптимального управления с ограничениями-равенствами для решения краевой задачи нелокального улучшения в пространстве состояний и эквивалентного условия улучшения в пространстве управлений сконструированы методы возмущений, которые не содержат операцию параметрического варьирования последовательных приближений. Обоснованы условия сходимости итерационных процессов методов возмущений.

Разработано алгоритмическое обеспечение для приближенного синтеза оптимального управления в нелинейных прикладных системах малой размерности. Для получения интервалов изменения фазовых координат, необходимых для алгоритмов синтеза, сначала исследуется структура множества достижимости посредством решения серии задач оптимального управления со свободным правым концом траектории. Эти алгоритмы находят совокупность граничных точек, выпуклая комбинация которых включает в себя искомое множество достижимости. Далее, если не выполняются условия строгой выпуклости этого множества, решается серия задач оптимального управления с терминальными условиями, их решения позволяют получить граничные точки множества достижимости, которые относительно выпуклой оболочки являются внутренними. Для получения эволюции изменения множества достижимости во времени применяются алгоритмы построения множеств достижимости, соответствующих различным интервалам времени управления, что обеспечивает получение фазовых ограничений, необходимых для работы дискретного варианта метода динамического программирования.

Для приближенного синтеза оптимального управления разработаны алгоритмы, основанные на представлении непрерывного процесса управления в виде дискретного многоэтапного процесса. На каждом этапе (при движении в обратном времени) вводится решетка по фазовым переменным и для каждого узла решетки,



принадлежащего множеству достижимости, находится условно оптимальное управление, переводящее систему во все узлы соседней решетки. Попытное движение прекращается при достижении заданных начальных условий, т.е. начального этапа процесса. Таким образом, оптимальное управление для любых заданных начальных условий из множества достижимости будет построено из кусков кривых (или прямых), являющихся условно оптимальными управлениями, переводящими систему с одной решетки на другую, пока не будет достигнуто заданное конечное состояние.

Рассмотрена теоретико-системная методология математического моделирования, вовлеченная в структурную идентификацию непрерывных нелинейных динамических систем с программно-позиционным управлением. Получены различные функционально-аналитические модификации характеристического признака экзогенного поведения (типа “вход-выход”) систем, допускающих в силу этого признака модельные реализации в классе квазилинейных нестационарных обыкновенных дифференциальных уравнений состояния в сепарабельном гильбертовом пространстве.

Исследована математическая модель загрязнения окружающей среды – водных объектов, включающая процессы формирования диффузионного потока из донных отложений (учет обмена в системе “вода-дно”), которая состоит из следующих блоков:

- гидрологический блок и динамика описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (уравнения Сен-Венана) с добавлением уравнения динамики концентрации взвеси в воде и уравнения баланса наносов (уравнение русловых деформаций) для описания отложений наносов и размыва грунта;

- блок качества воды использует одну из модификаций модели Стритера-Фелпса с учетом процессов сорбционного обмена и дополняется уравнениями баланса для сорбированного на взвесах вещества (сорбированное из растворенного органического вещества) и уравнением загрязнения слоя донных отложений;



- блок вторичного загрязнения описывает химические процессы в донных отложениях в сочетании с физико-химическими явлениями, биохимическими и биологическими процессами, сопровождающимися молекулярной диффузией в поровых растворах.

В основу численного решения положена явная схема локальных итераций (ЛИ-М). Исследованы свойства схемы ЛИ-М посредством сравнения результатов расчетов с известными точными решениями (уравнения теплопроводности) и расчетными методами решения характерных задач в описанной выше математической модели. Для дискретизации по пространственной переменной использована схема с разностями против потока. Полученная система уравнений позволяет с помощью метода установления получить стационарное решение (если оно существует), которое в дальнейшем при решении нестационарных задач используется как начальное условие. В этом случае начальные условия могут задаваться произвольно для всех типов нестационарных уравнений, входящих в общую постановку задачи.

Получена оценка влияния нестационарности (сезонности изменения внешних факторов) на направленность процессов обмена в системе “вода-дно”. Результаты расчетов (рис. 9) показали, что во время протекания переходных процессов, связанных с колебаниями концентрации загрязняющего вещества в придонном слое воды и сменой окислительно-восстановительной обстановки, значительно возрастает величина суммарного диффузионного потока вещества из донных отложений и диффузионный поток вторичного загрязнения зависит от величины и направления колебаний концентрации загрязняющего вещества в придонном слое воды.

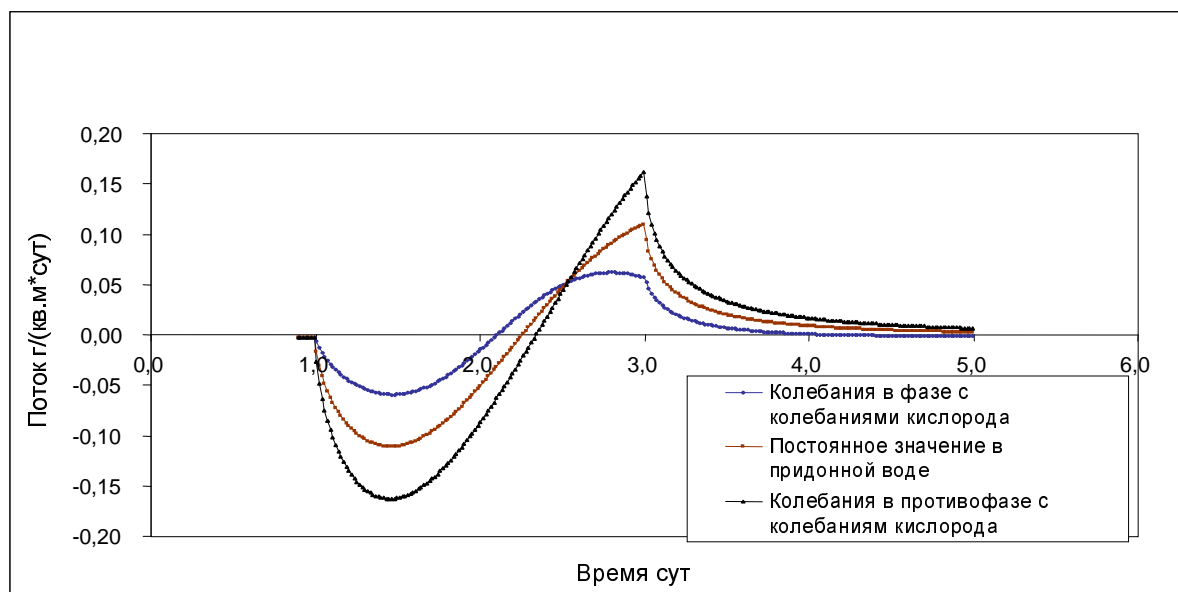


Рис. 9. Влияние на величину потока колебаний концентрации загрязняющих веществ и кислорода в придонном слое воды

Разработана система интеллектуальной поддержки процесса математического моделирования для медико-эколого-экономических систем. Система позволяет на основе знаний о предметной области и принципах моделирования с учетом заданной структуры модели, используя статистические данные наблюдений, сформировать модель, провести и проанализировать сценарные расчеты. Система состоит из трех частей. Первая часть – программная система, разработанная для автоматизации работы с моделями, позволяющая редактировать статистические данные, идентифицировать параметры модели, используя как методики идентификации на основе методологии идеализированных экспериментов, так и параметрическую идентификацию на основе метода улучшений, проводить многовариантные расчеты и их анализ. Вторая часть – экспертная система, имитирующая действия экспертов при построении моделей. Для формализованного представления знаний используются механизм продукционных правил и фреймы. Третья часть – средство для ввода и редактирования знаний о предметной области, основанное на свободно распространяемой системе Protégé.

Разработана структура модели динамики показателей здоровья населения, учитывающая уровень жизни населения (через учет доходов) и уровень здравоохранения. Относительно влияния уровня доходов на заболеваемость рассматри-



вается две основные гипотезы: с течением времени высокий уровень дохода приводит к уменьшению заболеваемости и высокий уровень дохода стимулирует оперативное реагирование на нарушения в состоянии здоровья.

Для снижения техногенного риска, обусловленного разрушением механических систем, осуществлена систематизация и классификация неопределенностей (рис. 10), обоснованы подходы, обеспечивающие совершенствование методологии прикладных исследований техногенной безопасности на всех стадиях жизненного цикла уникальных опасных механических систем (МС).

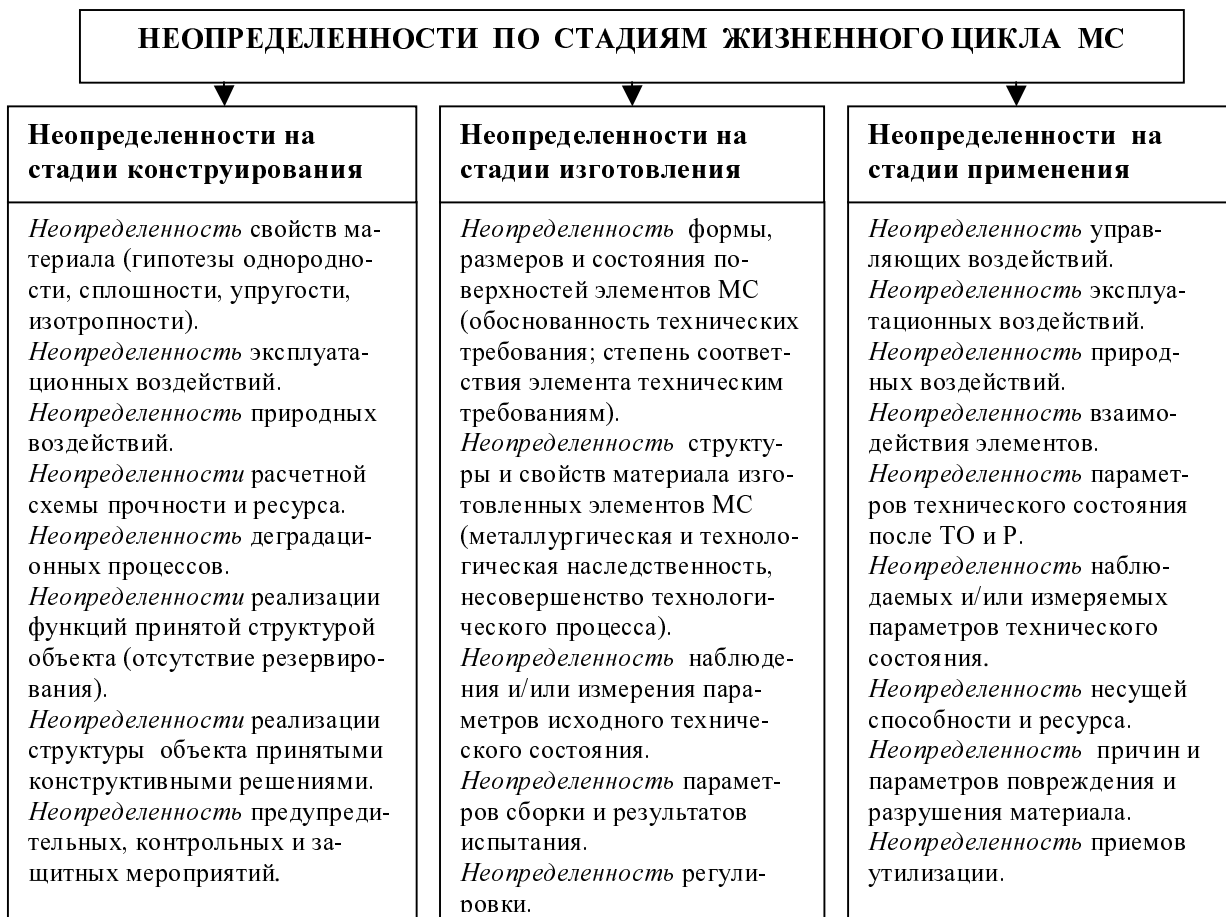


Рис. 10. Факторы неопределенности прочностной надежности опасных механических систем

Разработана модель и осуществлена программная реализация единого механизма получения информации о структуре и поведении как классов предметной области, так и классов программных объектов. Осуществлена спецификация ин-



терфейсов управления состоянием и поведением произвольных объектов по их описанию (рис. 11, 12).

Разработана модель программного компонента, обеспечивающая возможность использования его функций другой системой без внесения изменений в исходный код последней. В рамках данной модели в понятие программного компонента добавлено наличие внутренней памяти и унифицированного интерфейса компонента. Внутренняя память обеспечивает компоненту возможность использования в процессе работы неизвестной на момент создания информации, что позволяет в случае необходимости осуществить настройку базовой функциональности компонента на конкретную предметную область. Унифицированный интерфейс обеспечивает описание функциональности компонента, а также доступ к функциям другим компонентам (рис. 13).

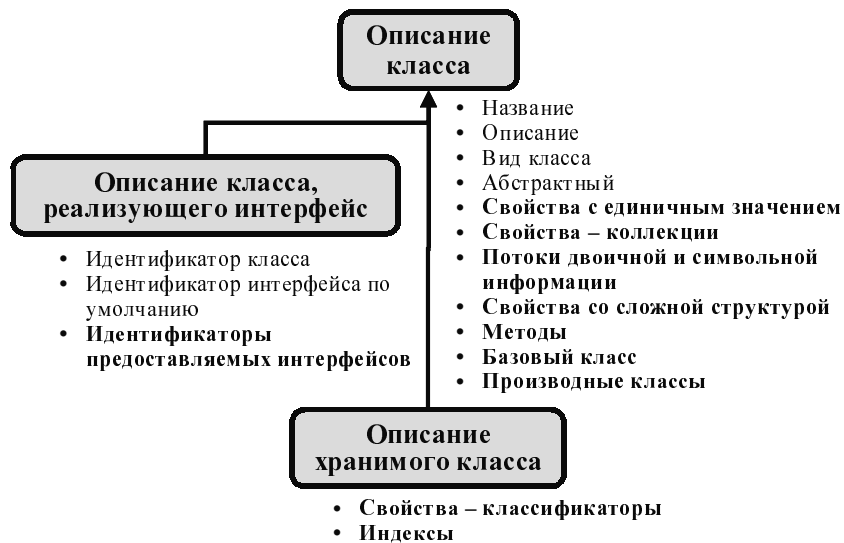


Рис. 11. Базовые интерфейсы описания классов

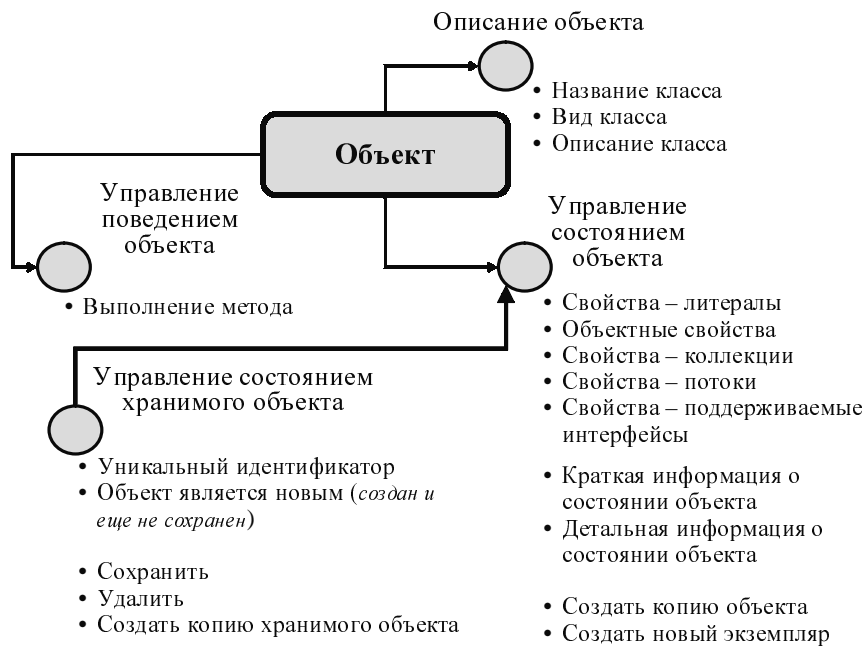


Рис. 12. Базовые интерфейсы управления состоянием и поведением объектов

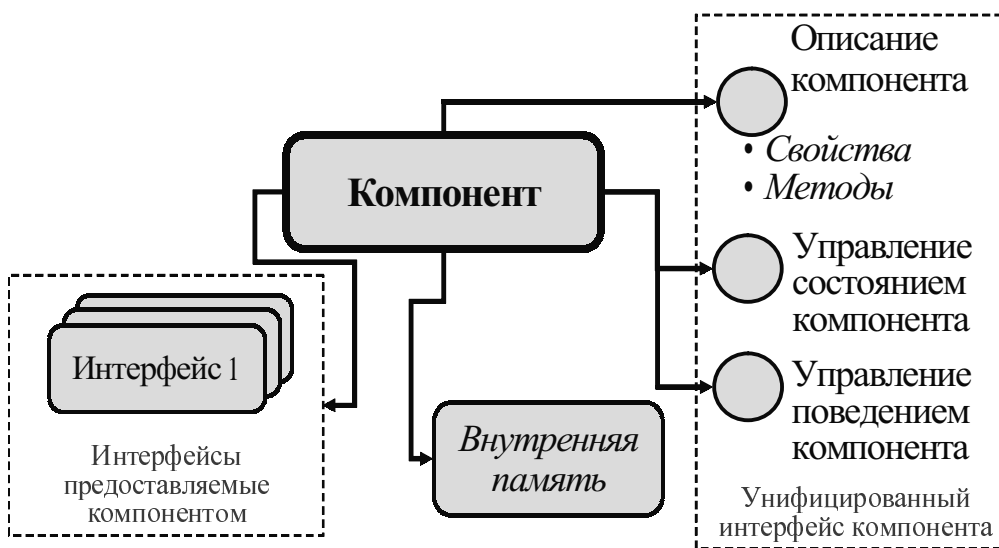


Рис. 13. Модель компонента



Проект 3.10.1.3. Поиск глобальных решений в невыпуклых задачах исследования операций и оптимального управления.

№ гос. регистрации: 01.2.007 08581

Научный руководитель – д.ф.-м.н. А.С. Стрекаловский.

Модифицирован программный комплекс по решению билинейных задач общего вида с несвязанными переменными, в результате удалось решить задачи размерности (100x100). Разработан первый вариант программного комплекса по решению линейно-линейных двухуровневых задач в оптимистической постановке и проведено его тестирование на задачах небольших размерностей. Исследованы взаимосвязи квадратично-линейных двухуровневых задач в оптимистической постановке с задачами математического программирования. Показано, что поиск решения в таких задачах эквивалентен решению семейства невыпуклых задач математического программирования с квадратично-билинейной структурой. Предложены и обоснованы новые методы локального и глобального поиска в квадратично-линейных двухуровневых задачах. Разработана подпрограмма генерации квадратично-линейных двухуровневых задач с известными локальными и глобальными решениями. Разработан первый вариант программного комплекса по поиску оптимистических решений в квадратично-линейных двухуровневых задачах. Проведено его тестирование на достаточно большом спектре случайно сгенерированных задач размерности до (50x50).

В качестве подготовительного этапа для построения и реализации параллельных алгоритмов решения двухуровневых задач разработан параллельный вариант программного комплекса по решению биматричных игр. Проведен вычислительный эксперимент по тестированию параллельного алгоритма на различном количестве Slave-процессоров от 1 до 8. Полученные результаты подтверждают эффективность реализованной параллелизации.

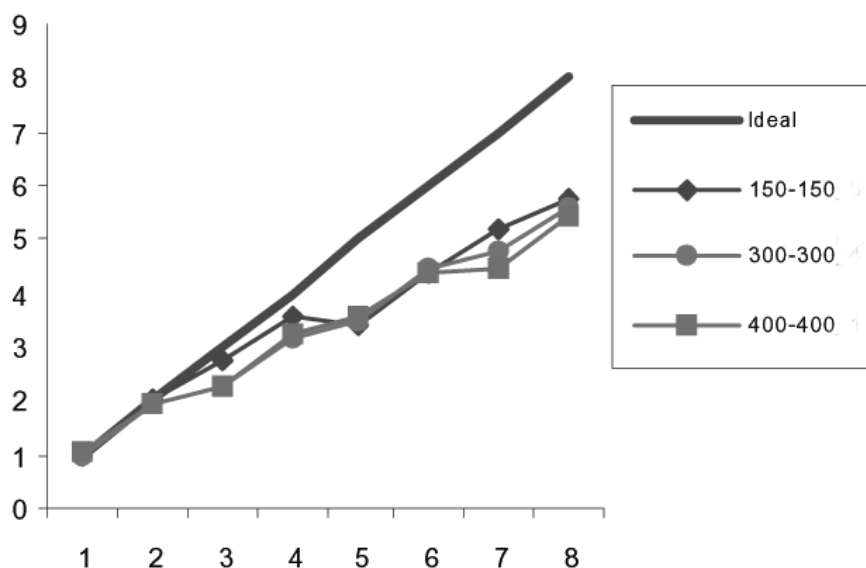


Рис. 14. График зависимости ускорения от количества Slave-процессоров на примере биматричных игр размерности (150x150), (300x300) и (400x400)

Для невыпуклых задач оптимального управления линейной системой с целевым терминальным функционалом, представленным в виде разности двух выпуклых функций (d.c. терминальным функционалом), предложен алгоритм поиска глобально оптимальных процессов управления, доказана теорема его сходимости. Разработан метод генерации тестовых задач оптимального управления линейными системами с квадратичным целевым функционалом, позволяющий строить примеры большой размерности с известными глобальными и локальными решениями. Разработан первый вариант программного комплекса по решению задач оптимального управления с минимизацией d.c. терминального функционала. На сгенерированных задачах проведено численное тестирование разработанного алгоритма глобального поиска.

Исследована линейная задача о дополнителности как частный случай задач оптимизации с ограничениями типа равенств. На основе теории глобального поиска разработаны алгоритмы локального и глобального поисков. Разработан первый вариант программного комплекса по решению линейных задач о дополнителности. Проведен вычислительный эксперимент на сериях задач линейной дополни-



тельности размерности до 400 со законнеопределенными матрицами, доказавший эффективность предлагаемого метода решения.

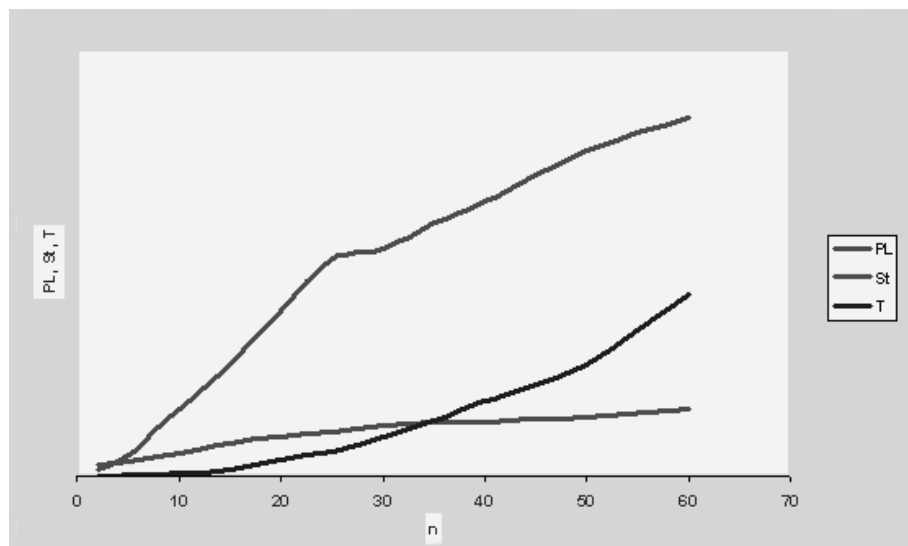


Рис. 15. График зависимости от размерности среднего времени решения (T) одной задачи о дополнительности, среднего количества линеаризованных задач (PL) и среднего количества пройденных стационарных точек (St) при решении линейных задач о дополнительности

Разработано несколько вариантов двойственного метода локального поиска для общей задачи д.с. минимизации. Исследована асимптотическая сходимость метода, разработаны критерии останова.

Усовершенствован программный комплекс для оптимизационных задач с д.с. ограничением-неравенством, с помощью которого удалось решить задачи размерности до 4000.

Доказана гомеоморфность вложения в универсальное пространство субдифференциалов непрерывных сублинейных функционалов, определенных на сепарабельных банаховых пространствах, с сохранением аффинности гомеоморфизма и непрерывности в сильной топологии. Эта схема развита для непрерывных сублинейных операторов, определенных на сепарабельных банаховых пространствах, со значениями в пространстве непрерывных функций $C(X)$ на компакте X , или, более общо, в пространствах Линденштрауса. Установлено, что таким универсальным



пространством вышеуказанных классов пространств является множество компактных линейных операторов на сепарабельном гильбертовом пространстве.

Для задачи о p -медиане усовершенствован алгоритм метода ветвей, отсечений и оценок, основу которого составляют метод генерации столбцов и метод отсекающих плоскостей, в результате чего удалось решить практические задачи, порождающие графы с более чем 80 тысячами вершин и 6 миллионами дуг. Предложенная параллелизация метода позволила добиться линейного параллельного ускорения времени счета на 8 процессорах. В качестве приложения рассмотрена задача автоматического распознавания и классификации дефектов, возникающая при разработке систем машинного зрения. Предложено построение функции классификации на основе кластерного анализа. На первом этапе решения задачи происходит автономный процесс обучения системы, во время которого обучающие выборки анализируемых признаков дефектов разбиваются на кластеры, в которых находятся медианы. На втором этапе в режиме реального времени происходит процесс инспектирования, при котором входящий образец классифицируется в соответствии с типом ближайшей медианы. Сравнительный анализ продемонстрировал эффективность изложенного подхода относительно других методов классификации.

Предложена непрерывная постановка известной NP-трудной комбинаторной задачи поиска максимальной клики (ЗМК) в графе как непрерывной задачи с d.c. ограничением, доказана эквивалентность этой постановки и ЗМК. Разработан алгоритм по решению ЗМК и проведен вычислительный эксперимент на графах из библиотеки DIMACS (<ftp://dimacs.rutgers.edu/pub/challenge/graph/benchmarks>) с количеством вершин до 4000. Результаты, полученные для ЗМК, обобщены на задачу о максимальной взвешенной клике (ЗМВК). Проведен вычислительный эксперимент по решению ЗМВК в непрерывной постановке на взвешенных графах из библиотеки DIMACS, который показал высокую эффективность предложенного алгоритма по качеству решения по сравнению, например, с алгоритмом QualexMS, разработанным С. Бусыгиным (<http://www.busygin.dp.ua/npc.html>).

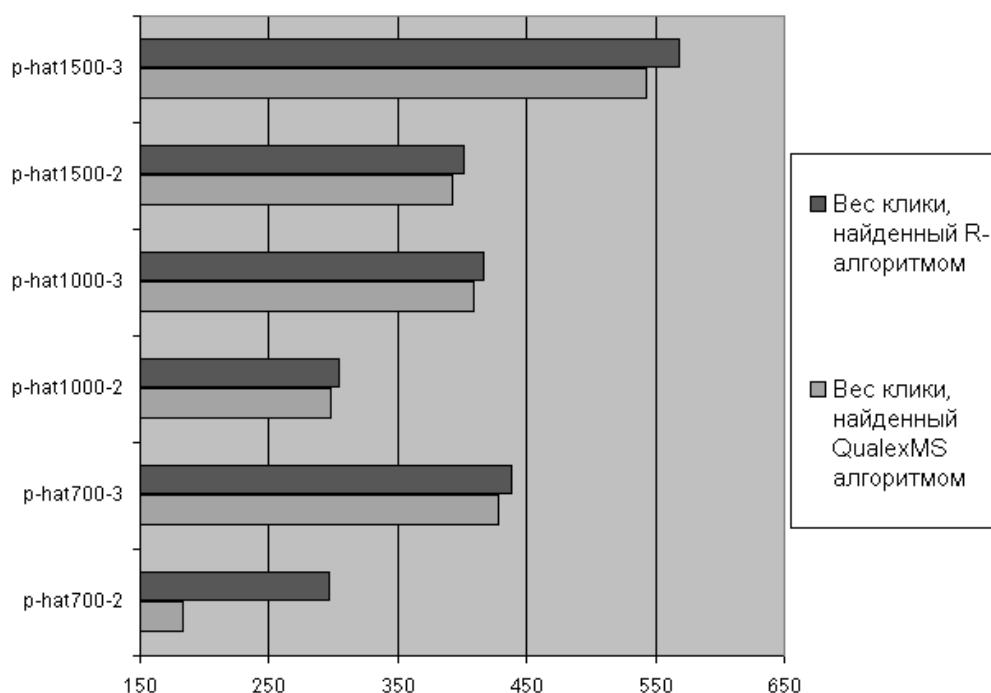


Рис. 16. Диаграмма весов найденных алгоритмами клик в “p-hat” графах из библиотеки DIMACS

Для решения ЗМК и получения верхних оценок для размерности максимальной клики применена методика оценивания аппроксимаций, разработанная для задачи d.c. максимизации на основе понятия σ -плотности. Сравнение полученных верхних оценок с оценками, предложенными ранее другими специалистами, показало преимущество данного подхода.

На основе библиотеки программ для параллельного метода ветвей и отсечений в сотрудничестве с Университетом Санье (Италия) разработан решатель для задач целочисленного линейного программирования в общем виде. Проведен обширный вычислительный эксперимент на трех вычислительных кластерах с общим количеством процессоров 66 по решению тестовых задачах из библиотеки MIPLIB (<http://miplib.zib.de>).

Для решения задачи составления школьного расписания разработана двух-этапная эвристика. На первом этапе используется алгоритм псевдоотжига со спе-



специальным подбором параметров, на втором – полученное решение улучшается специальным методом локального спуска в неполиномиальной окрестности, основанным на решении задачи целочисленного программирования. Подход протестирован на практических примерах.

Развит подход к синтезу систем виброзащиты объектов, подверженных воздействию стохастических возмущений, основанный на методике аналитического конструирования оптимальных регуляторов. Обобщена методика аналитического конструирования оптимальных регуляторов на случай постоянно действующих стационарных, стохастических возмущений. Показана возможность технической реализации синтезированной виброзащитной системы с помощью упруго-демпфирующих подвесов и амортизаторов с преобразованием движения.

4. Проблемы создания глобальных и интегрированных информационно-телекоммуникационных систем и сетей. Развитие технологий grid.

Программа 4.5.2. Разработка научных основ распределенной информационно-аналитической системы на основе ГИС и Веб-технологий для междисциплинарных исследований.

Проект 4.5.2.1. Интеллектуальные методы и инструментальные средства создания и анализа интегрированных распределенных информационно-аналитических и вычислительных систем для междисциплинарных исследований с применением ГИС, GRID- и Веб-технологий.

№ гос. регистрации: 01.2.007 08582

*Научные руководители: д.т.н. И.В. Бычков, д.т.н. Г.А. Опарин,
к.т.н. Г.М. Ружников*

Разработан эффективный принцип хранения неизменяемых данных, позволяющий сократить расход оперативной памяти и минимизировать время загрузки информации из файла. С использованием предложенного подхода разработан векторный формат SMD. Реализован модуль расширения Web-сервера IIS для публи-



кации в Internet/Intranet электронных карт в формате SMD. Реализованы конвертеры в формат SMD из форматов ГИС Панорама, ArcView и MapInfo. Разработанные конвертеры поддерживают импорт не только семантической и метрической информации, но и информации о способе отображения объектов. Таким образом, для публикации в Internet/Intranet, подготовленной в одном из вышеупомянутых форматов карты, ее необходимо конвертировать в формат SMD, при этом конвертация информации о способе отображения позволяет получить внешний вид карты, близкий к оригиналу.

Разработан формат MRG (Multi Resolution Grid – сетка переменного разрешения) для представления больших объемов растровых данных, заданных на регулярной сетке, например, матриц высот. Предложенный формат содержит представления для сеток с меньшими уровнями детализации и обеспечивает компактное хранение информации.

Разработан механизм многопользовательского представления картографической информации в сетях Internet/Intranet в форматах ГИС ArcView и Панорама, который позволяет удаленным пользователям работать с электронными картами без использования дополнительного программного обеспечения.

Разработана технология предоставления выкопировки, которая включает набор тематических слоев и позволяет получать нужный участок электронной карты с учетом режима секретности топоосновы. Разработан механизм хранения электронных документов в базе данных, при помощи которого пользователю нет необходимости сохранять документы на жестком диске ПК в случае, если необходимо редактировать документ, а потом заново загружать его в базу данных.

Для формирования реляционной базы данных разработан метод извлечения таблиц из неформатированного текста. Метод решает следующие задачи извлечения таблиц: обнаружения таблиц в неформатированном тексте, сегментации обнаруженных таблиц на отдельные клетки, структурного анализа (определение взаимосвязей между отдельными клетками), функционального анализа (определение роли клеток в таблице), интерпретации промежуточной модели таблицы и преоб-



разование ее в отношении реляционной модели. Разработано программное обеспечение, которое позволяет автоматически и полуавтоматически извлекать таблицы из документов, представленных как неформатированный текст. Результатом его работы являются таблицы реляционной базы данных.

В рамках развития технологии метаописания структур БД разработан механизм описания способов отображения таблиц БД в виде пользовательских форм. Технология позволяет объединять простые элементы отображения и редактирования данных на форме в группы, что позволяет сгенерировать наиболее удобный для пользователя интерфейс. Разработаны менеджеры компоновки элементов управления на форме на основе опыта разработки менеджеров в языке Java. Менеджеры компоновки получают из метаописаний структур БД информацию о составе и взаимосвязи полей таблиц БД и три возможных размера каждого поля (максимальный, оптимальный и минимальный). Максимальный размер поля соответствует размеру поля таблицы БД, а оптимальный и минимальный вычисляются по определенному для каждого типа поля алгоритму. Расстановка элементов управления на форме происходит по алгоритму, реализуемому выбранным менеджером с использованием вышеописанных размеров и с применением алгоритма оценки веса (важности) элемента управления формы. Менеджер компоует интерфейс так, чтобы пользователю были видны все необходимые данные из таблицы (если это возможно) и эти данные были читабельными.

В рамках разработки технологии интерпретации ограничений и их интеграции в программный код каркаса программной системы для работы с базами данных (ПСБД) получен механизм извлечения ограничений из модели, описывающей структуру ПСБД в соответствии с MDA концепцией создания программных систем. Разработана технология, извлекающая формализованные ограничения, заданные на языке OCL, для модели, представленной в виде XMI-документа. Созданный на основе библиотеки libxml2 транслятор позволяет извлекать ограничения и представлять их в виде термов языка программирования Prolog. Правила пролога распознают термы заданной структуры и выделяют из этих структур формализо-



ванные ограничения, в виде OCL-выражений. OCL-выражения представляются в виде предикатов языка Prolog.

Реализованы настраиваемые подсистемы лексического и синтаксического анализа исходных текстов программ в инструментальном средстве, предназначенном для автоматизации анализа исходных текстов программ, написанных на императивных языках программирования.

В рамках формирования основ распределенной информационно-аналитической системы на основе ГИС и Веб-технологий для междисциплинарных исследований создан прототип информационно-аналитической системы “Фотосинтез хвойных Восточной Сибири” (ИАС ФС) как общенаучного информационного ресурса Единой распределенной информационной системы СО РАН для поддержки проведения фундаментальных научных исследований институтами СО РАН по решению проблем, связанных исследованием эмиссии и стока углерода в лесных экосистемах. Создана структура базы данных ИАС ФС по информации СИФИБР СО РАН. Проведено ее частичное наполнение данными часовых значений нетто-фотосинтеза сосны, ели и лиственницы и соответствующих им показаний по факторам среды (освещенности, температуры, относительной влажности воздуха, запасов влаги и температуры почвы), а также создана система запросов для решения информационно-аналитических задач. На основе анализа геоданных ландшафтного плана района дельты Селенги, подготовленных Институтом географии СО РАН, создан фрагмент интегрированного хранилища графических данных, ориентированного на экологическое землепользование. Сформирована база данных информационно-аналитической системы “Тралово-акустического наблюдения и лова байкальского омуля”, проведено ее частичное наполнение траловыми данными Лимнологического института СО РАН за последние пять лет.

Адаптирован программно-аппаратный навигационный комплекс “Сигнал”, основанный на глобальной системе позиционирования (GPS), сети сотовой связи, цифровой топооснове и ГИС для определения скорости поверхностных течений оз. Байкал.



Предложен новый подход к построению GRID-системы, обеспечивающей возможность интеграции информационно-вычислительных и коммуникационных ресурсов в рамках ИНЦ СО РАН. Создаваемая GRID-система представляет распределенную гетерогенную вычислительную среду (PBC).

Подход основан на построении для среды модели, включающей спецификации аппаратных компонентов (компьютеров и коммуникационных интерфейсов), спецификации системного и прикладного программного обеспечения, а также множество зависимостей между программно-аппаратными ресурсами, и на использовании в роли менеджеров ресурсов PBC систем пакетной обработки, совместимых с инструментарием Globus Toolkit. В качестве узлов PBC могут использоваться вычислительные кластеры выделенных и невыделенных рабочих станций.

На верхнем уровне абстракции построена теоретико-множественная модель PBC (рис. 17) в виде структуры $R = \langle HW, CND, SW, P, TP, PT, NL, NC, NH, NS, JOB, JS, JP, JSM, JM \rangle$, где:

- HW (HardWare) – множество значимых характеристик аппаратных средств узлов PBC, элементы которого представляют собой тройки $\langle PP, RAM, DM \rangle$, где PP (Peak Performance) – пиковая производительность узла, RAM – объем оперативной памяти узла и DM (Disk Memory) – объем дисковой памяти узла;
- CND (Channels and Network Devices) – технические средства коммуникаций PBC;
- SW (SoftWare) – множество программных средств, размещенных в узлах PBC; подмножества SA, UA \subseteq SW (System Applications and Users Applications) представляют соответственно совокупности системных и пользовательских приложений;
- P (Parameters) – множество параметров (концептов) приложений из SA и UA; подмножества SYS, IN, OUT \subseteq P определяют соответственно параметры системных приложений из SA, входные и выходные параметры пользовательских приложений из UA;



- TP (Types of Parameters) – множество допустимых типов параметров в PBC (простые и структурированные типы параметров, в том числе файлы);
- $PT \subseteq P \times TP$ (Parameters and types) – отношение, определяющее множество типизированных параметров в PBC;
- NL (Nodes Locations) – множество адресов узлов PBC;
- $NC \subseteq NL \times CND$ (Nodes and Channels) – отношение, определяющее топологию сети передачи данных PBC;
- $NH \subseteq NL \times HW$ (Nodes and Hardware) – отношение, определяющее множество аппаратных ресурсов в узлах PBC;
- $NS \subseteq NL \times SW$ (Nodes and Software) – отношение, определяющее множество программных ресурсов в узлах PBC;
- JOB – множество заданий пользователей PBC;
- $JS \subseteq JOB \times SW$ (Jobs and Software) – отношение, определяющее множество приложений в заданиях;
- $JP \subseteq JOB \times P$ (Jobs and Parameters) – отношение, определяющее множество параметров приложений в заданиях;
- JSM (Job Start Modes) – множество допустимых режимов запуска задания в PBC;
- $JM \subseteq JOB \times JSM$ (Jobs and Modes) – отношение, определяющее возможность запуска задания в допустимых режимах PBC.

Выписаны условия целостности и непротиворечивости представленной модели PBC. Реализована графическая инструментальная среда, предназначенная для описания представленной выше модели PBC.

Разработана технология имитационного моделирования PBC. Даная технология включает методы автоматизации построения моделей, имитационного моделирования и распределенных вычислений, моделируемые вычислительные процессы научно-технического характера (процессы решения прикладных и фундаментальных исследовательских задач), инструментальные средства проектирования PBC, программно-аппаратную среду, в которой выполняется процесс модели-



рования. Перечисленные компоненты объединяются в единую технологическую цепочку для определения параметров проектируемой РВС, необходимых для обеспечения требуемых показателей ее отказоустойчивости и надежности.

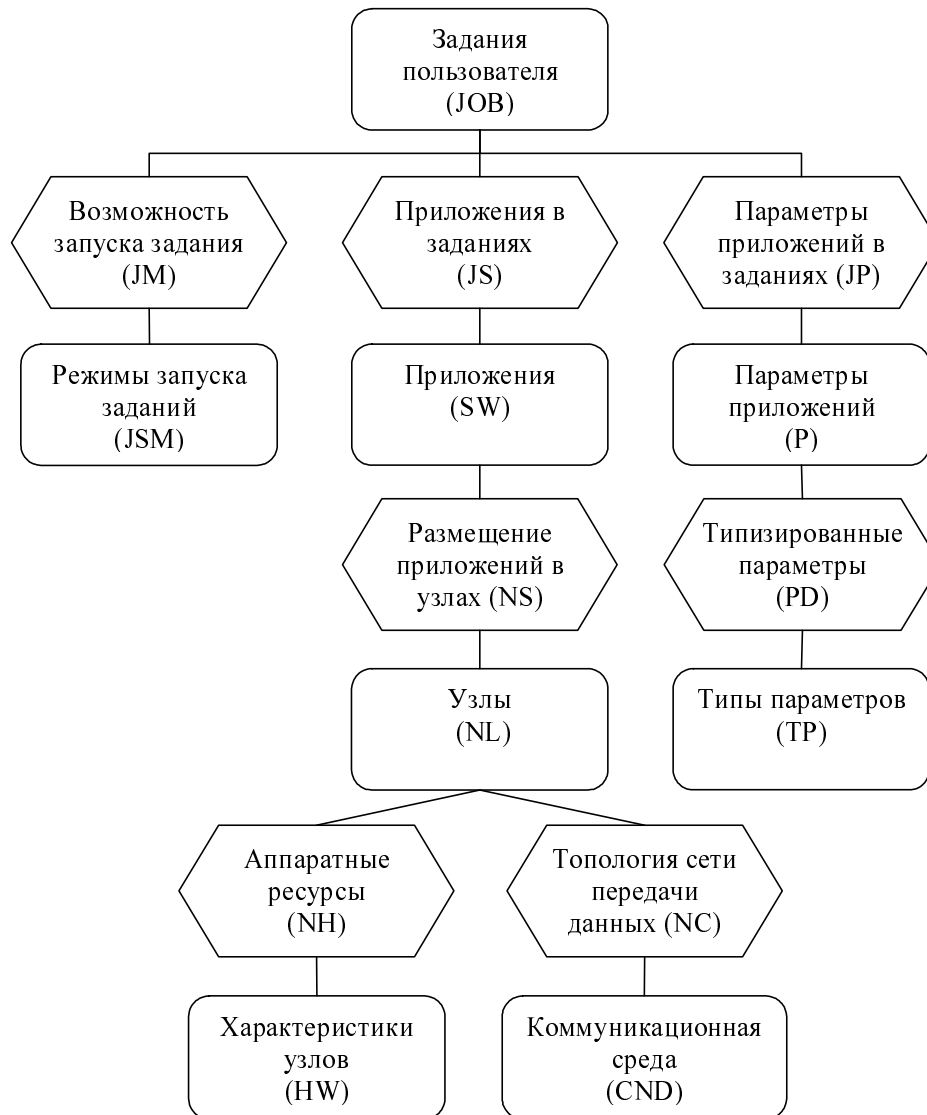


Рис. 17. Концептуальная схема РВС. В качестве базового средства имитационного моделирования используется система GPSS World

Для поддержки выполнения распределенной имитационной GPSS-модели и обеспечения отказоустойчивости процесса моделирования реализованы система управления распределенными вычислениями, коммуникационная библиотека, обеспечивающая синхронизацию модельного времени и передачу сообщений между сегментами GPSS-модели, модуль создания контрольных точек (КТ).



В качестве менеджера ресурсов (промежуточного программного обеспечения) в процессе моделирования использована система Condor.

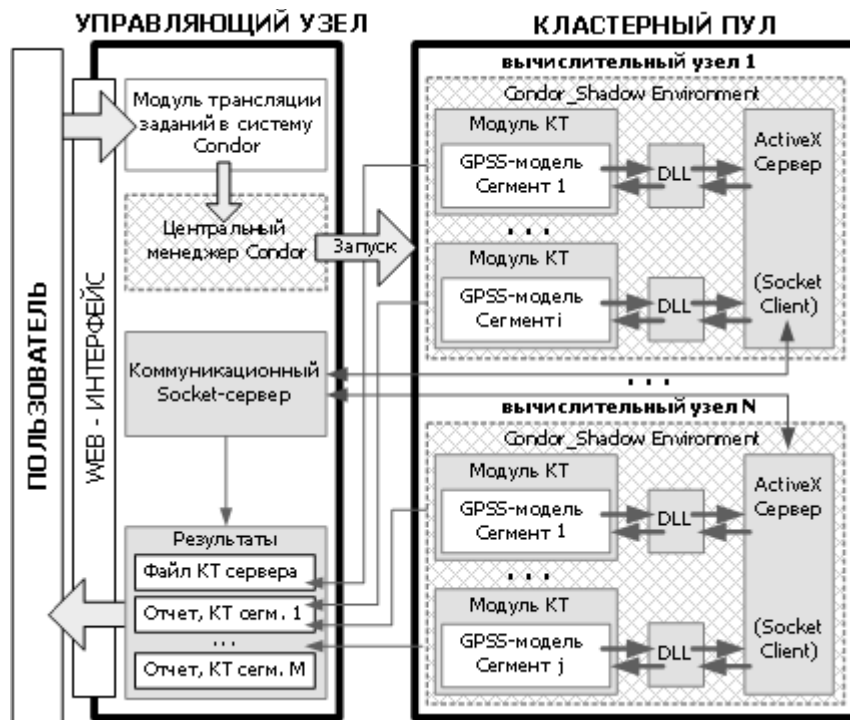


Рис. 18. Среда выполнения распределенной имитационной модели

Предложена схема декомпозиции исходной SAT-задачи на семейство SAT-задач, рассматриваемых как очередь заданий для вычислительного кластера. Разработан метод статистического прогнозирования параметров декомпозиции, оптимальной по вычислительной трудоемкости. В основе метода лежит задача оптимизации специальной прогнозной функции на ее области определения. Решение данной задачи дает прогнозируемое оптимальное значение базового параметра декомпозиции. Использование описанной техники позволило осуществить успешный логический криптоанализ ряда поточных систем шифрования, не поддававшихся последовательному криптоанализу (пороговый генератор, суммирующий генератор, генератор Гиффорда). Создан программный комплекс “Distributed-SAT 1.0”, позволяющий решать SAT-задачи в распределенных вычислительных средах с использованием метода прогнозных функций. Основные принципы технологии показаны на примере задачи криптоанализа порогового генератора.

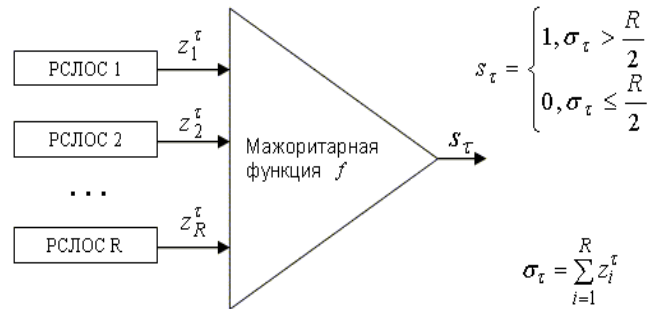


Рис. 19. Схема работы порогового генератора

Здесь РСЛОС – регистр сдвига с линейной обратной связью: все РСЛОС сдвигаются синхронно, после чего выдаваемые ими биты смешиваются при помощи мажоритарной функции. Рассматривался генератор с пятью РСЛОС ($R=5$), задаваемыми следующими полиномами обратной связи:

РСЛОС1 – $(11, x^{11} + x^{10} + x^8 + x^3 + 1)$, РСЛОС2 – $(13, x^{13} + x^9 + x^8 + x^2 + 1)$,

РСЛОС3 – $(15, x^{15} + x^{14} + x^{12} + x^2 + 1)$, РСЛОС4 – $(16, x^{16} + x^{14} + x^8 + x^3 + 1)$,

РСЛОС5 – $(17, x^{17} + x^{15} + x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + 1)$.

В задачу криптоанализа генератора входило определение начального заполнения РСЛОС1–5, то есть 72 бит инициализирующей последовательности, при известных 150 битах выходной последовательности. Рассматриваемая задача была поставлена как SAT-задача. На последовательном компьютере она решена не была (вычисление на РС прерывалось после 28 суток работы). При решении соответствующей задачи на кластере МВС1000/16 был построен прогноз оптимальных параметров декомпозиции. Для этой цели решалась задача оптимизации прогнозной функции.

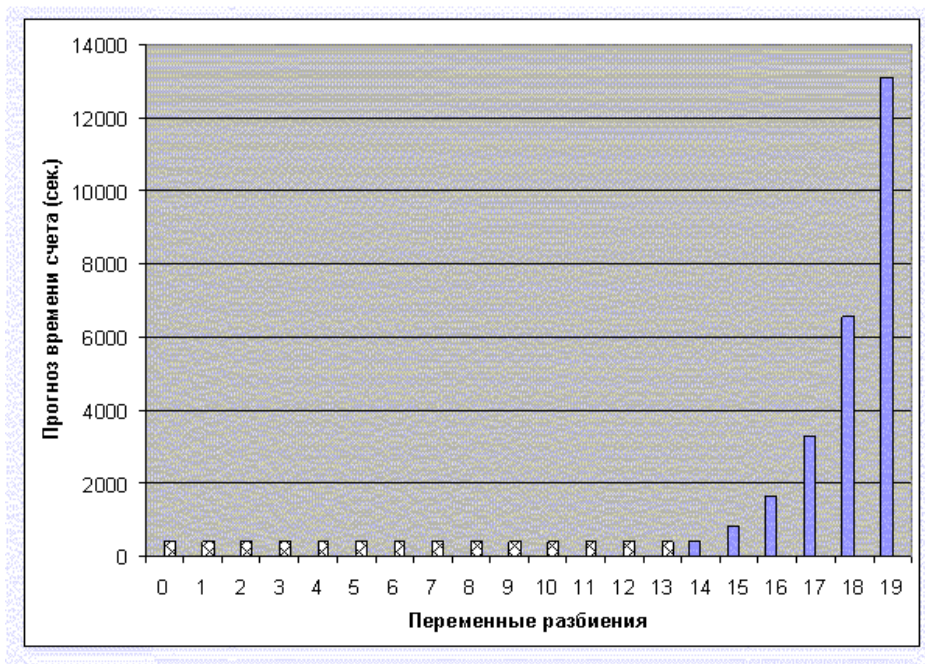


Рис. 20. Графическое отображение процедуры

График означает, что наименьшая по вычислительным затратам прогнозируемая декомпозиция КНФ – это декомпозиция по первым 14 переменным. Прогнозное время счета распараллеленной задачи на МВС1000/16 при данной декомпозиции – 30-40 минут, реальное время счета – 1-1,5 часа.

Разработан комбинированный метод решения систем логических уравнений, использующий как BDD-представления булевых функций, так и SAT-подход. Доказана полнота и корректность соответствующих алгоритмов, показано, что задача построения релевантных булевых ограничений может рассматриваться в контексте задачи поиска кратчайшего пути во взвешенном графе. Предложено и исследовано одно семейство общерекурсивных монотонных функций в классе вычислимых семейств общерекурсивных функций.