



## **ВАЖНЕЙШИЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

### **Приоритетное направление 1. Теоретическая математика**

#### **1. Компактность многозначных отображений со значениями в пространстве полиэдров.**

Найдены условия предкомпактности и компактности множеств в пространстве многозначных отображений, определенных на локально компактном пространстве, с топологией равномерной сходимости на компактах. Значениями отображений являются полиэдры в равномерно выпуклом банаховом пространстве.

*Автор: чл.-к. РАН А.А. Толстоногов*

#### **2. Условия робастной устойчивости для стационарных и нестационарных линейных систем дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ) с интервальными коэффициентами.**

Исследовалась робастная устойчивость линейной системы ДАУ с интервальными коэффициентами произвольно высокого индекса неразрешенности. ДАУ имеют многочисленные приложения, в частности, в теплоэнергетике. Основная трудность, возникающая при исследовании робастных свойств ДАУ, связана с тем, что даже в простейших случаях при сколь угодно малом возмущении коэффициентов может измениться внутренняя структура системы и, следовательно, вид общего решения, в результате чего структура и свойства невозмущенной системы могут потерять для анализа всякое значение. В связи с этим были найдены некоторые линейные соотношения, которым должны подчиняться элементы интервальных коэффициентов системы для того, чтобы размерность пространства решений и структура общего решения интервального семейства были такими же, как у невозмущенной системы. Такие возмущения названы «сохраняющими внутреннюю структуру». В предположениях, обеспечивающих сохранение структуры, получены условия робастной устойчивости для стационарных и нестационарных систем ДАУ с переменными и постоянными интервальными возмущениями, у которых неопределенность может присутствовать во всех матричных коэффициентах.

*Авторы: д.ф.-м.н. А.А. Щеглова, А.Д. Кононов.*

#### **3. О связи свойств вырожденной линейно-квадратичной задачи управления и уравнения Эйлера-Пуассона.**

Рассмотрен квадратичный функционал с линейными связями в виде дифференциальных уравнений с тождественно вырожденными матрицами перед производной вектор-функции состояния. Выделена структура общих решений таких систем и некоторые их свойства. На этой основе получены условия неотрицательности целевого функционала и условия малого отклонения управления от стационарной точки при малых значениях функционала.

*Автор: д.ф.-м.н. В.Ф. Чистяков.*



**4. Развитие метода предельных уравнений для исследования асимптотического поведения неавтономных систем.**

Разработан метод предельных дифференциальных включений для неавтономных управляемых систем с запаздыванием, и изучен вопрос асимптотического поведения неавтономных систем управления с приложением к механическим системам управления.

*Автор: д.ф.-м.н. И.А. Финогенко.*

**5. Позиционный принцип минимума в задачах оптимального управления.**

Позиционным принципом минимума называется необходимое условие глобальной оптимальности для нелинейных задач оптимального управления, основанное на позиционном варьировании и существенно усиливающее фундаментальный принцип максимума Л.С. Понтрягина (ПМП). Примечательно, что такого усиления удастся добиться, не выходя за рамки конструкций ПМП.

Это необходимое условие обобщено на негладкие задачи оптимального управления, а также в несколько ослабленной, аппроксимативной форме – на задачи с терминальными ограничениями на траекторию. Сфера его применимости расширена нелинейными задачами дискретного и импульсного управления (в том числе с полиномиальными импульсными воздействиями). На основе полученных теоретических результатов разработаны эффективные нелокальные численные алгоритмы оптимального управления.

Результаты могут быть использованы для разработки программного обеспечения для решения прикладных задач робототехники, экономики, создания систем машинного обучения и искусственного интеллекта.

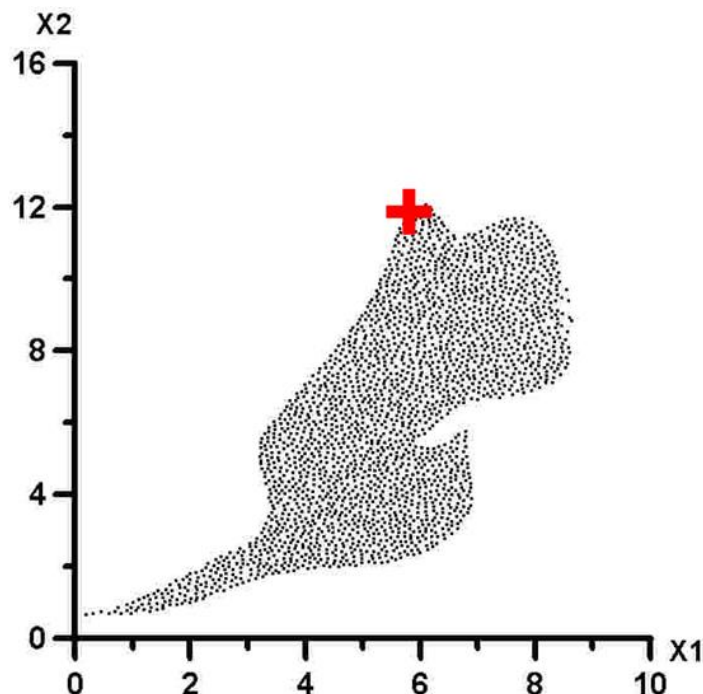


Рис. 1. Невыпуклое множество достижимости в тестовой задаче оптимального управления, решенной позиционными итерациями

*Авторы: д.ф.-м.н. В.А. Дыхта, к.ф.-м.н. Е.В. Гончарова, к.ф.-м.н. О.Н. Самсонюк,  
к.ф.-м.н. М.В. Старицын, к.ф.-м.н. С.П. Сорокин.*



**6. Технология аппроксимации множества достижимости управляемой алгебро-дифференциальной системы.**

Рассматривается нелинейная алгебро-дифференциальная система с линейной зависимостью от управляющих воздействий. Предложен алгоритм, основанный на редукции, к задаче оптимального управления стандартного типа и ее многократном решении. Введением дополнительной фазовой переменной и дополнительного управления «алгебраическая» переменная приводится к динамическому типу. В качестве функционала рассматривается интегральная невязка, порождаемая исходными уравнениями типа равенства. Численное решение поставленной серии задач производится в автоматическом режиме, при этом неудачные решения с невязкой, превышающей заданное пороговое значение, из «аппроксимирующего облака» удаляются.

В качестве примера рассмотрена управляемая система  $\dot{x}_1 = x_2 + 0.25u$ ,  $\dot{x}_2 = u - \sin(x_1)$ ,  $0 = x_1 - 0.25u$ ,  $x_1(0) = 5$ ,  $x_2(0) = 0$ ,  $u(0) = 20$ , определенная на временном интервале  $t \in [0, 6]$ . На управляющие воздействия накладываются ограничения  $|u(t)| \leq 1$ . Для данной системы возможно произвести очевидную редукцию к каноническому виду – управляемой системе в нормальной форме Коши. Результаты сравнения расчетов, полученных с применением редукции к стандартному виду и с использованием предложенного алгоритма, приведены на рис. 2.

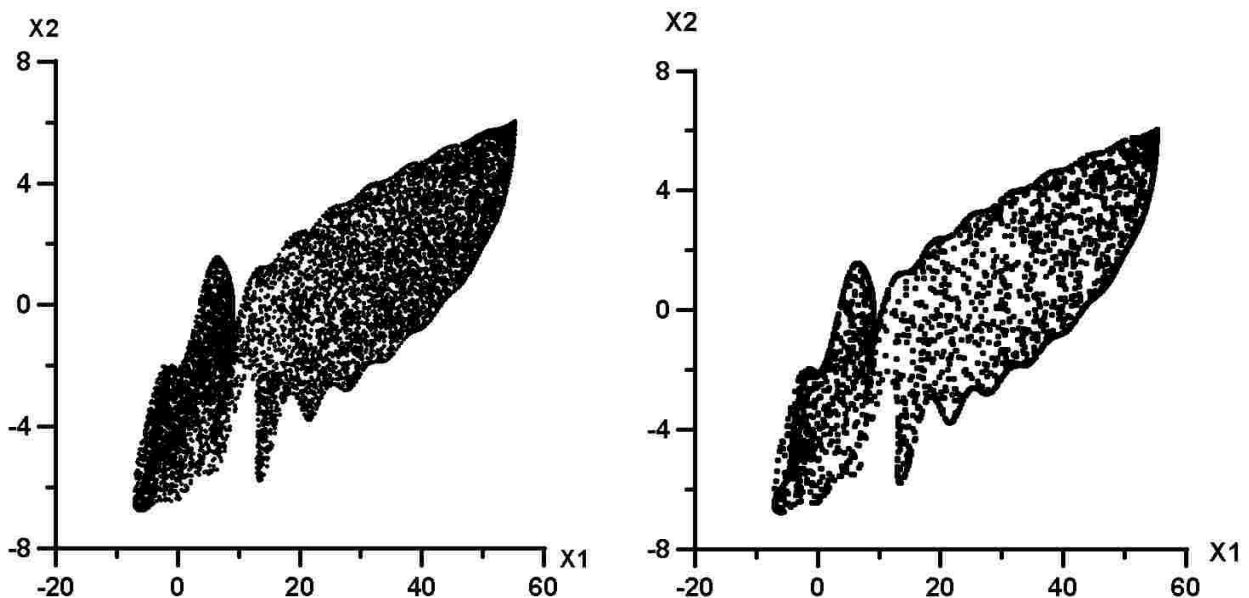


Рис. 2. Множество достижимости в тестовом примере, построенное с помощью  
а) редукции к стандартному виду; б) предложенного алгоритма

Авторы: д.т.н. А.Ю. Горнов, А.С. Аникин, к.т.н. Т.С. Зароднюк,  
П.С. Сороковиков.



## 7. Вычислительная технология аппроксимации интегральной воронки управляемой системы с множеством допустимых управлений полиэдрального типа.

Разработана вычислительная технология для аппроксимации интегральной воронки управляемой системы с множеством допустимых управлений полиэдрального типа. Технология основана на априорном задании сетки дискретизации по времени с фиксированным постоянным шагом и поочередном рассмотрении задач аппроксимации множества достижимости для всех узлов сетки. Для покрытия множеств достижимости используется модификация алгоритма стохастической аппроксимации, опирающегося на пробные управляющие воздействия релейного типа. Равномерность покрывающей множества «облачной» аппроксимации достигается с применением специализированного алгоритма селекции, реализующего удаление из базы слишком близко расположенных точек.

На рис. 3 представлены результаты вычислительных экспериментов по построению сечений интегральной воронки для системы  $\dot{x}_1 = u_2 + x_1 x_2$ ,  $\dot{x}_2 = u_1 - 5 \sin x_1$  с начальными условиями  $x_1(0) = 5$ ,  $x_2(0) = 0$ . Допустимое множество полиэдрального вида задано угловыми точками  $(-1,1)$ ,  $(1,-1)$ ,  $(1,1)$ ,  $(-1,-1)$ ,  $(3.5,0)$  и отражено на равномерной сетке по времени от 0 до множества узлов  $\{0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.1, 0.2, \dots, 1.0\}$ .

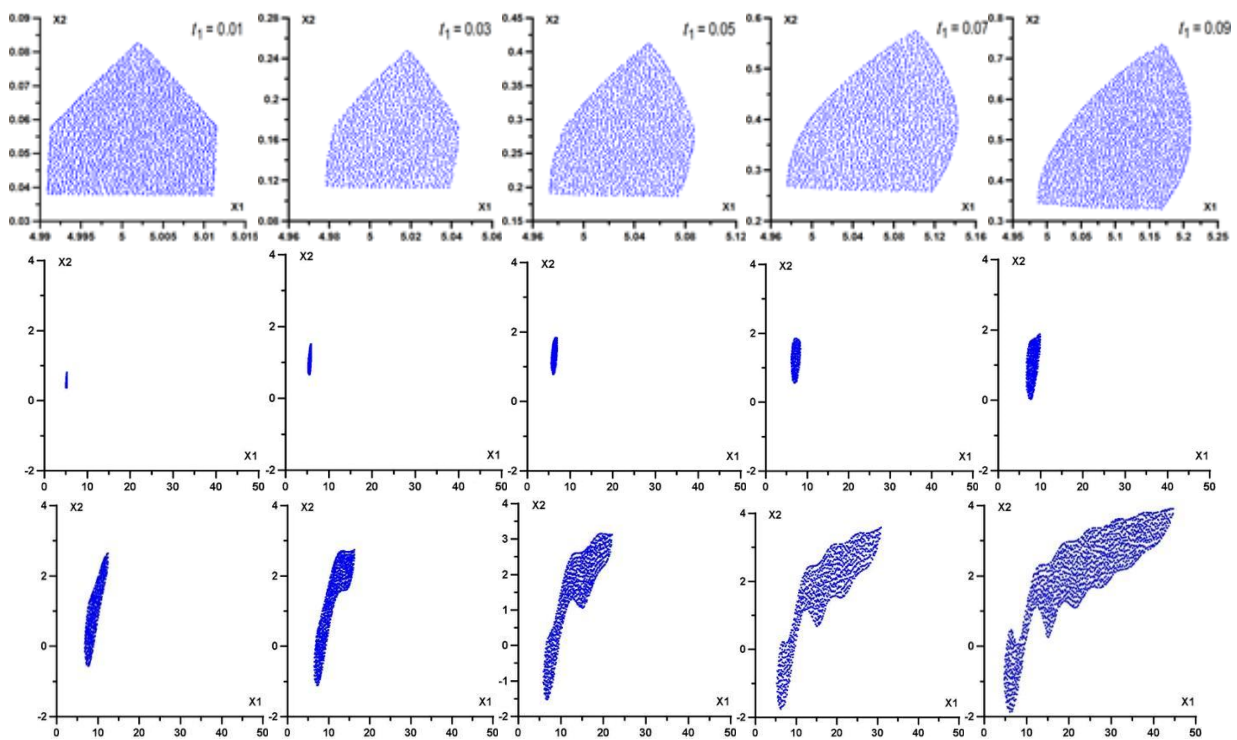


Рис. 3. Сечения интегральной воронки для рассмотренной системы с допустимым полиэдральным множеством на равномерной временной сетке от 0 до множества узлов  $\{0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.1, 0.2, \dots, 1.0\}$

Автор: д.т.н. А.Ю. Горнов.



## **8. Точные решения нелинейных систем типа реакции-диффузии.**

Изучены нелинейные системы типа реакции-диффузии, моделируемые системами уравнений параболического типа со степенными нелинейностями. Предложена конструкция точных решений, позволяющая декомпозировать процесс отыскания компонент, зависящих от времени и пространственных координат. Установлены связи с обыкновенными дифференциальными уравнениями и уравнениями с запаздыванием (опережением). Построены многопараметрические семейства точных решений, задаваемых элементарными функциями, специальными функциями Якоби, гармоническими функциями. Выделены случаи взрывающихся (*blow-up solution*) или периодических по времени и анизотропных по пространственным переменным точных решений. Построенные многомерные точные решения являются новыми, ранее в литературе не встречались. Такого рода системы описывают процессы нелинейной диффузии в реагирующих многокомпонентных сплошных средах, встречаются в математической биологии и химической кинетике. Найденные точные решения могут использоваться как рабочие режимы в химических технологиях.

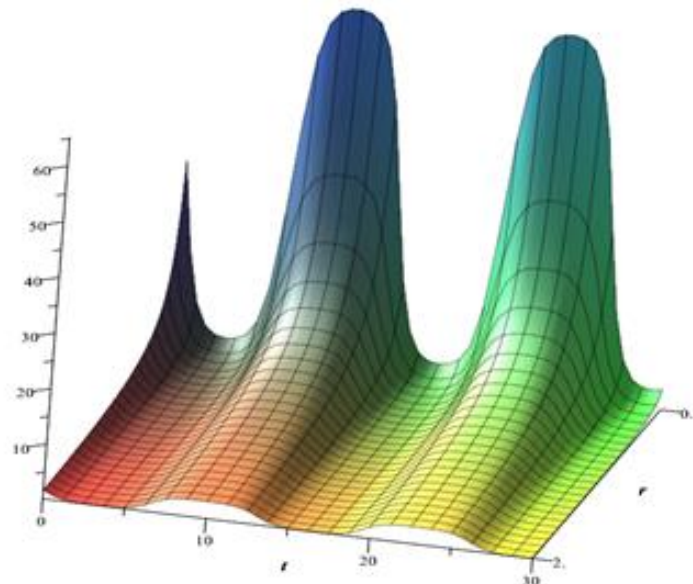


Рис. 4. Пример положительного изотропного по пространству и периодического по времени точного решения нелинейной системы типа реакции-диффузии, выражаемого через специальные функции Якоби

*Авторы: к.ф.-м.н. Э.И. Семенов, к.ф.-м.н. А.А. Косов.*

## **9. Дифференциальная реализация билинейной системы второго порядка в гильбертовом пространстве.**

Получены необходимые и достаточные условия реализации в сепарабельном гильбертовом пространстве нестационарной билинейной дифференциальной системы второго порядка (в том числе гиперболической), содержащей в качестве допустимых решений заданный не ограниченный по мощности (конечный / счетный / континуальный) нелинейный пучок бесконечномерных управляемых динамических процессов.

*Авторы: д.ф.-м.н. А.В. Лакеев, д.ф.-м.н. В.А. Русанов.*



## Приоритетное направление 38. Проблемы создания глобальных и интегрированных информационно-телекоммуникационных систем и сетей. Развитие технологий и стандартов GRID

### 1. Двухуровневый эволюционный подход к маршрутизации группы подводных роботов в условиях периодической ротации состава.

Предложен двухуровневый подход к динамическому планированию стратегии группы автономных подводных роботов, основанный на декомпозиции миссии на последовательность рабочих периодов с обязательным сбором действующей группировки по окончании каждого из них. Задача планировщика на верхнем уровне заключается в составлении такого расписания циклов зарядки аппаратов в группе, которое обеспечивало бы своевременное пополнение батарей при недопущении одновременной зарядки большого количества роботов. На основе построенного расписания декомпозиция миссии осуществляется таким образом, чтобы каждый сбор группы сопровождался либо выходом робота из группы для осуществления подзарядки, либо возвращением в группу после нее. Такая схема позволяет регулярно отслеживать статус группы и осуществлять оперативное перепланирование при изменении ее состава. За маршрутизацию группы на каждом рабочем периоде отвечает низкоуровневый планировщик, работающий на графе целей и учитывающий технические возможности всех аппаратов в группе, а также все действующие ограничения и требования к выполнению конкретных задач миссии. Разработан и программно реализован эволюционный подход к децентрализованной реализации планировщиков с применением специализированных эвристик, современных процедур улучшения решений, оригинальных схем кодирования и оценки решений.

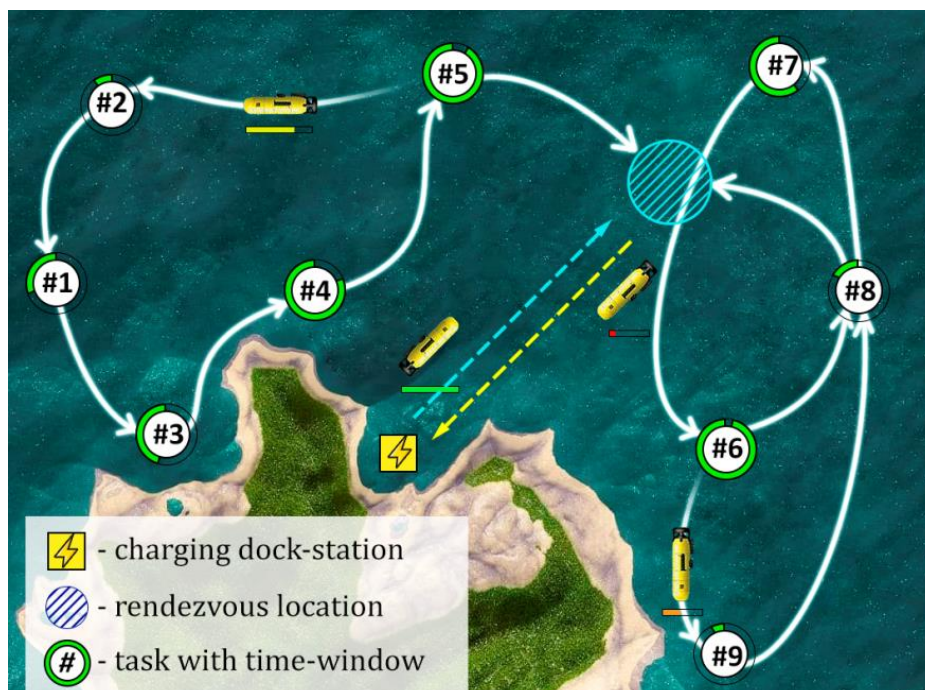


Рис. 5. Схематическое представление выполнения многоцелевой миссии группой автономных подводных роботов с непостоянным составом

Авторы: М.Ю. Кензин, ак. И.В. Бычков, к.т.н. Н.Н. Максимкин.



## 2. Мультиагентная технология управления распределенными вычислениями для решения больших задач в гетерогенной среде в рамках междисциплинарных исследований.

Разработана новая мультиагентная технология управления масштабируемыми приложениями для решения больших задач в гетерогенной распределенной вычислительной среде (ГРВС, рис. 6), обеспечивающей в отличие от известных интеграцию Grid и облачных вычислений. Фундаментальной основой мультиагентного управления является уникальная концептуальная модель, агрегирующая знания о специфике решаемых задач и свойствах среды. Эффективность применения разработанной технологии показана в рамках междисциплинарных исследований по решению крупномасштабных практических задач анализа направлений развития ТЭК России, оптимизации транспортной и складской логистики. При использовании мультиагентного управления в процессе решения задач получены ускорение и эффективность вычислений в ГРВС, близкие к линейному ускорению и эффективности, равной 1. Решение этих задач позволило совместно со специалистами из смежных предметных областей выявить критически важные объекты газотранспортной сети России и оптимизировать процессы транспортной и складской логистики на крупном хладокомбинате, являющемся вторым предприятием России по объему единовременного хранения от Урала до Дальнего Востока.

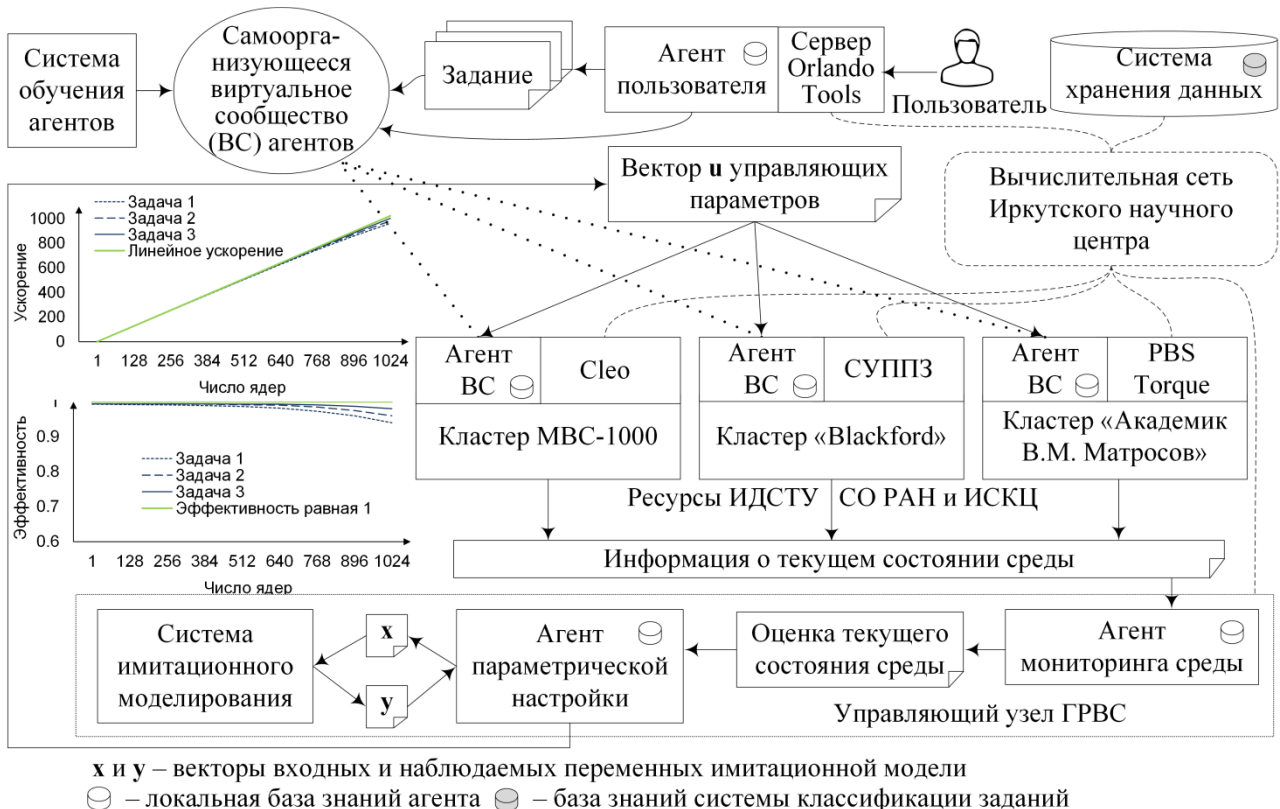


Рис. 6. Гетерогенная распределенная вычислительная среда с мультиагентным управлением

Авторы: ак. И.В. Бычков, к.т.н. А.Г. Феоктистов, к.т.н. И.А. Сидоров,  
к.т.н. С.А. Горский, Р.О. Костромин.



### 3. Технология интеллектуализации децентрализованного управления распределенными вычислениями.

Предложена новая технология разработки самоорганизующейся мультиагентной системы децентрализованного управления распределенными вычислениями (рис. 7а). Используется агентский (ориентированный на прикладные микросервисы) способ организации вычислений на основе прямых семантических взаимодействий прикладных агентов решателя (рис. 7б), обеспечивающих в отличие от косвенных взаимодействий лучшую адаптируемость к динамическим средам и более высокую реактивность к внешним изменениям. Технология применена для разработки распределенных мультиагентных решателей NP-сложных задач синтеза управления в двоичных динамических системах и качественного анализа автономных двоичных динамических систем (рис. 7в), имеющих практическое применение в геномных регуляторных сетях.

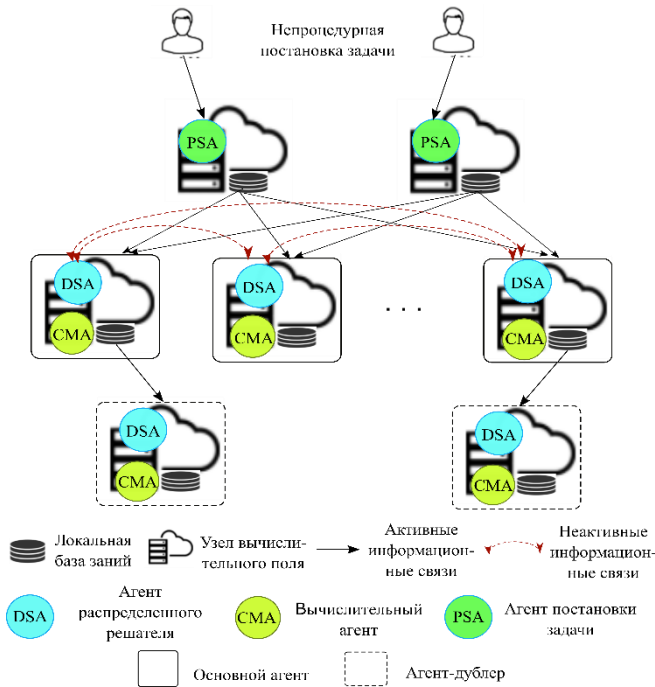


Рис. 7а. Архитектура мультиагентного решателя, разработанного по предложенной технологии

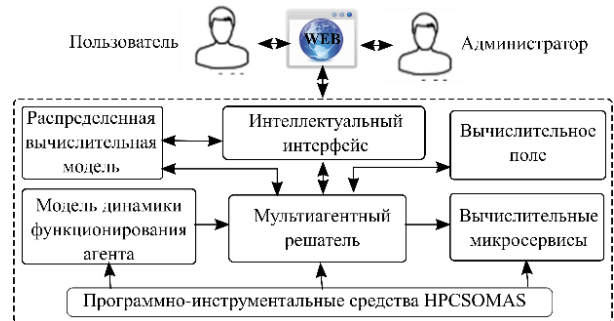


Рис. 7б. Разработанные авторами математические, информационные и программно-инструментальные средства, составляющие основу новой технологии



Рис. 7в. Ускорение разработанного решателя в сравнении с традиционным решателем BNS

Авторы: ак. И.В. Бычков., д.т.н. Г.А. Опарин, к.т.н. В.Г. Богданова,  
А.А. Пашинин, к.т.н. С.А. Горский.





#### 4. Предметно-ориентированный декларативный язык описания трансформаций концептуальных моделей (Transformation Model Representation Language, TMRL).

Разработан предметно-ориентированный декларативный язык описания трансформаций концептуальных моделей (Transformation Model Representation Language, TMRL), включающий конструкции для описания не только преобразуемых структур и связей между ними, но и механизма взаимодействия с внешними программными компонентами трансформаций. Язык позволяет абстрагироваться от конкретики специализированных языков трансформаций моделей общего назначения (например, ATL, QVT) и использовать созданные ранее компоненты трансформации. Применение языка обеспечивает создание баз знаний интеллектуальных систем на основе модельных трансформаций.

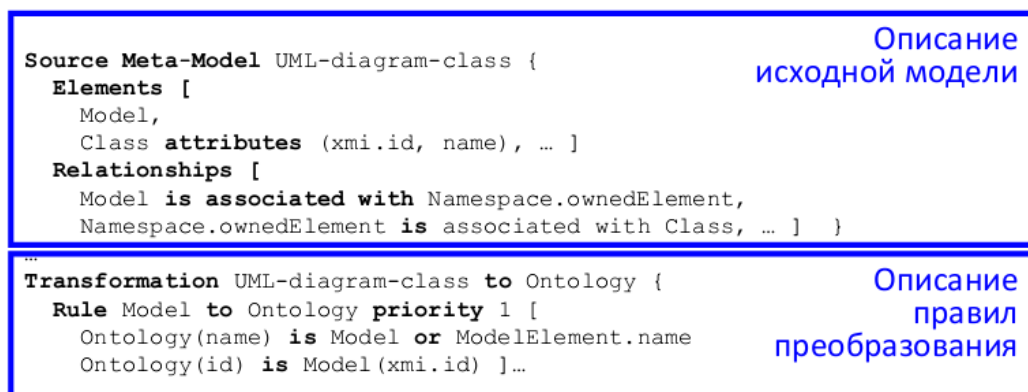


Рис. 8. Пример конструкций TMRL

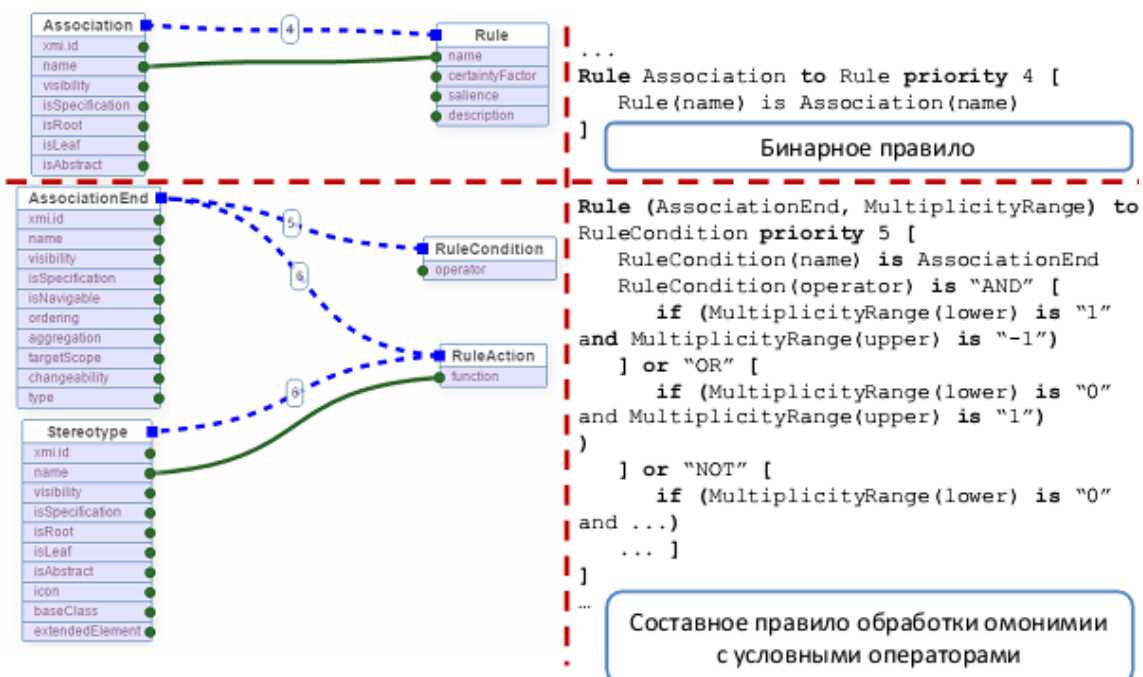


Рис. 9. Примеры редактора трансформаций моделей и правил на TMRL

Авторы: к.т.н. Н.О. Дородных, к.т.н. А.Ю. Юрин.



**5. Алгоритмы улучшения триангуляций, представляющих рельеф.**

Для триангуляций, служащих для представления рельефа местности, разработан ряд новых алгоритмов их улучшения: алгоритм исправления артефактов, возникающих при построении триангуляций по изолиниям рельефа; алгоритм замены фрагмента триангуляции на другой, содержащий более точные данные; алгоритм сглаживания триангуляции.

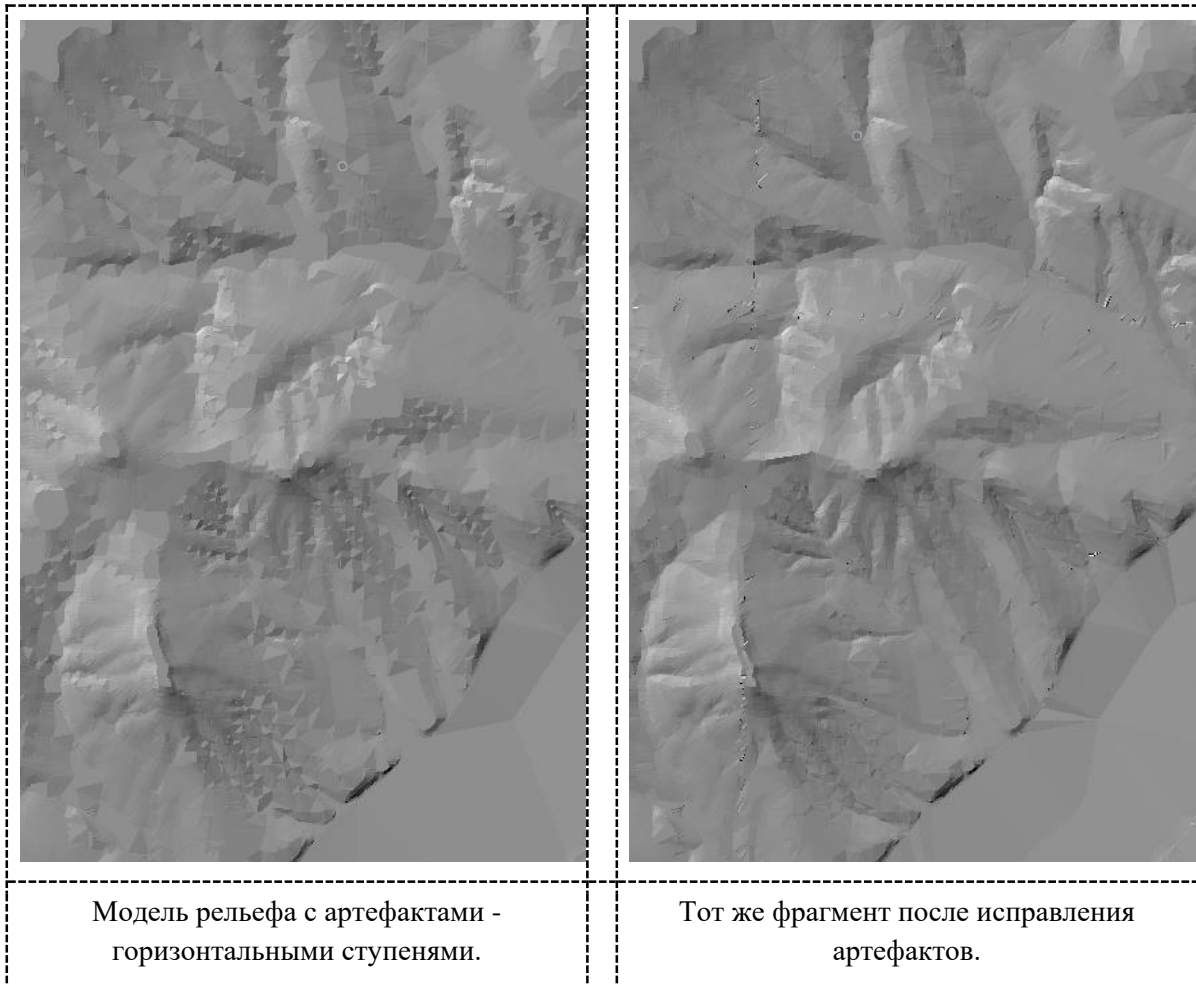


Рис. 10. Результат работы алгоритма

*Авторы: к.т.н. А.Е. Хмельнов, к.т.н. А.С. Гаченко,  
Т.Ф. Хмельнова, д.т.н. Г.М. Ружников.*



**6. Методы и технологии поиска сервисов распределенной сервис-ориентированной среды на основе анализа спецификаций существующих сервисов и данных.**

Разработаны метод и технологии поиска сервисов в рамках распределенной сервис-ориентированной среды. Предлагается производить поиск на основе заранее сформированной семантической сети сервисов. Семантическая сеть сервисов определяет возможные связи сервисов в соответствии с передаваемыми данными, т.е. дуги этой сети задают возможность элементарной композиции – цепочки выполнения из двух сервисов, когда результаты работы одного сервиса могут быть применены в качестве входных данных другого сервиса. Для построения семантической сети предлагается метод, основанный на анализе статистических данных о применении сервисов пользователями. В системе выполнения сервисов и их композиций ведется сбор данных о произведенных вызовах сервисов. Данные включают название сервиса и его адрес, значения входных и выходных параметров, время выполнения сервисов, успешность выполнения, ошибки выполнения и т.д. В методе для анализа вызовов используется алгоритм, который производит поиск сочетания вызовов сервисов, в которых файл, являющийся результатом работы одного сервиса, передается в качестве параметра другому сервису.

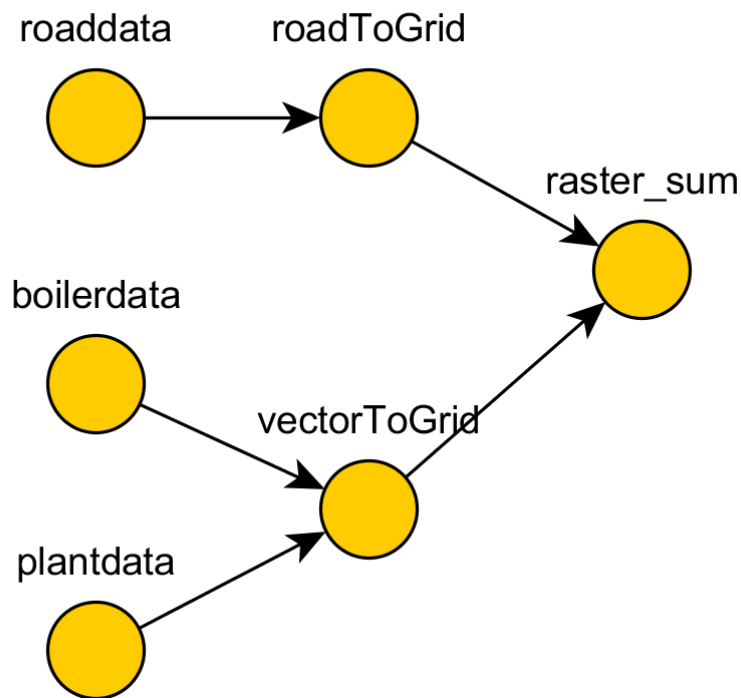


Рис. 11. Полученная семантическая сеть

*Авторы: к.т.н. Р.К. Федоров, А.С. Шумилов, к.т.н. А.Ю. Авраменко,  
А.А. Ветров, к.т.н. А.К. Попова.*



## 7. Концепция и модель инструментальной платформы извлечения и трансформации произвольных электронных таблиц.

Разработана концепция и модель инструментальной платформы разработки систем извлечения и трансформации данных из произвольных электронных таблиц в реляционную форму на основе исполнения правил анализа и интерпретации табличной компоновки и содержания. Платформа предоставляет предметно-независимую объектную модель таблицы и формальный язык правил анализа и интерпретации произвольных таблиц. В отличие от современных конкурентных решений предлагаемая платформа не ограничивается встроенными свойствами таблиц, обусловленными предметной областью. Она обеспечивает разработку и исполнение облегченных декларативных программ извлечения данных из произвольных таблиц. Реализован прототип веб-ориентированной системы трансформации произвольных таблиц в формате Excel к плоским файловым базам данных. Формальный язык платформы был адаптирован для обеспечения интерпретации табличных документов при создании технологии кросс-контекстного обмена документами с внедренной семантической разметкой.

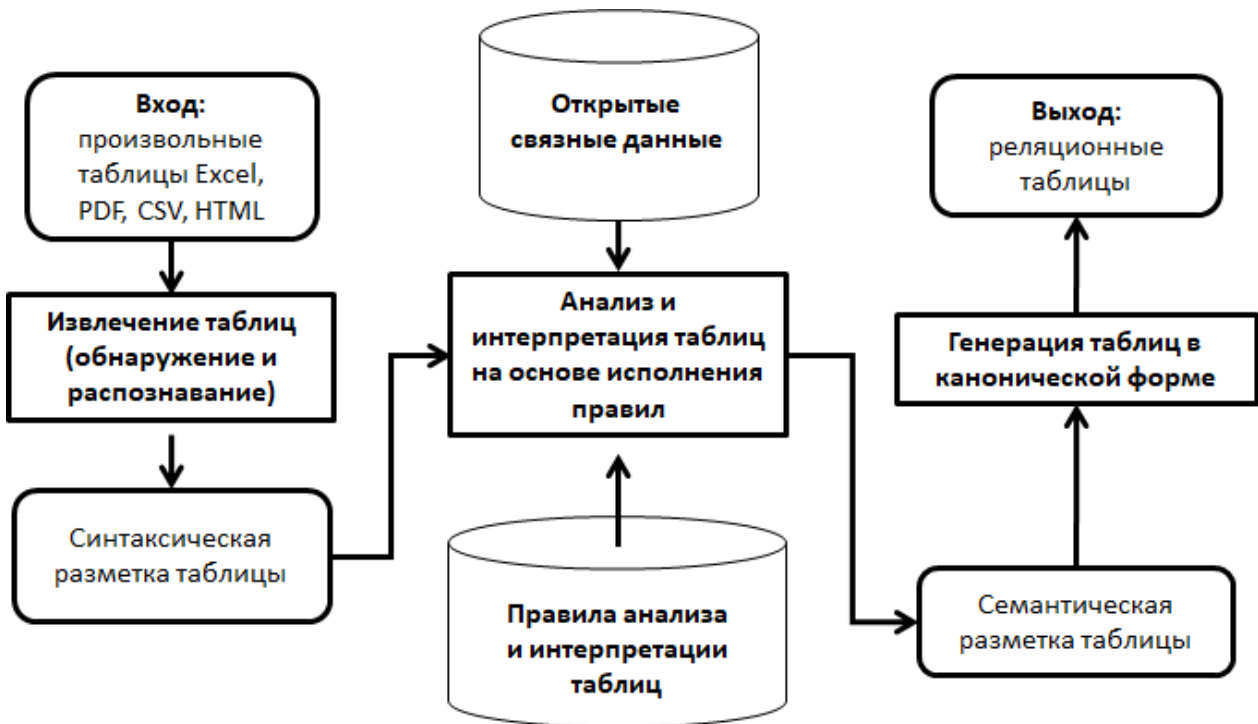


Рис. 12. Модель платформы

Авторы: ак. И.В. Бычков, к.т.н. А.О. Шигаров, к.т.н. А.А. Михайлов,  
В.В. Христюк.



**8. Точный параллельный метод решения задачи оптимального замещения.**

Разработан новый точный параллельный метод решения задачи оптимального замещения, в которой дано множество товаров (конфигураций) и спрос (количество) на каждый товар. Некоторые товары могут быть заменены на другие, более дорогие. Необходимо выбрать ограниченное множество товаров для производства, удовлетворяя общий спрос и минимизируя переплату за замены (см. пример на рис. 13).

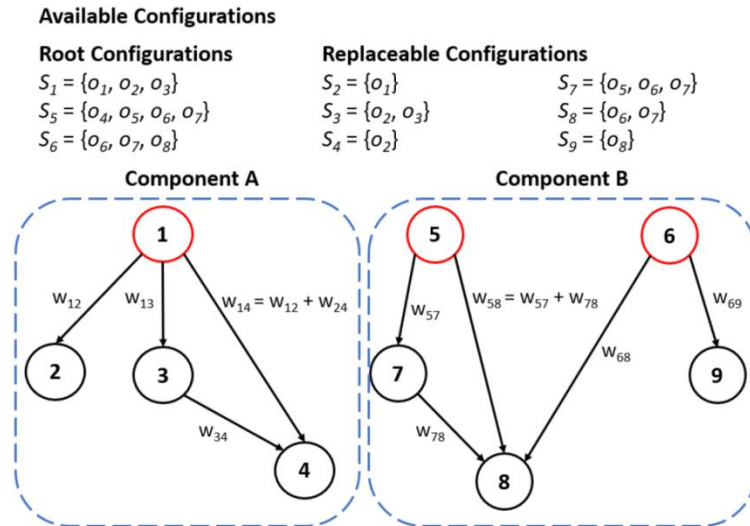


Рис. 13

Разработанный метод базируется на редукции исследуемой задачи к задаче о р-медиане на несвязном ациклическом графе. Новизна разработанного параллельного алгоритма заключается в одновременном использовании нескольких подходов, таких как декомпозиция задачи, релаксация Лагранжа, метод имитации отжига, метод динамического программирования.

Произведена реализация и тестирование разработанного метода на практической задаче производства компонентов электропроводки в автомобильной промышленности. Практические примеры содержат более 100 тысяч конфигураций и 8 миллионов возможных замещений (переменных). Предложенная параллельная схема алгоритма позволяет добиться параллельного ускорения, близкого к идеальному (см. рис. 14).

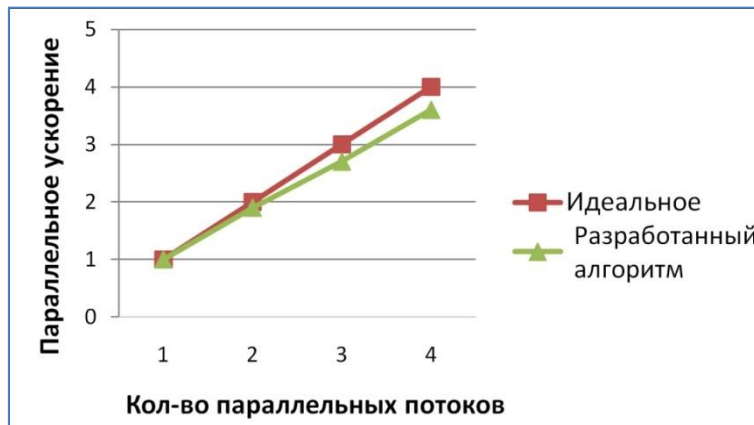


Рис. 14

Авторы: к.ф.-м.н. И.Л. Васильев, к.ф.-м.н. А.В. Ушаков.



**9. Новый метод построения одного класса алгебраических атак на ряд симметричных алгоритмов шифрования.**

В основе разработанного метода лежит понятие инверсного множества с лазейкой (Inverse Backdoor Set, IBS). Каждое IBS является основой для криптографической атаки из класса «угадывай и определяй» (guess-and-determine). В рамках такой атаки требуется решить набор систем алгебраических уравнений над полем  $GF(2)$ . Задача решения каждой системы сводится к проблеме булевой выполнимости (SAT). Время атаки на основе конкретного IBS вычисляется в форме значения псевдобулевой функции типа «черный ящик». Для поиска IBS, обеспечивающего атаку наименьшей трудоемкости, применяются метаэвристические алгоритмы (Tabu Search, Simulated Annealing, (1+1)-Evolutionary Algorithm). С использованием разработанного метода построены рекордные по трудоемкости атаки на ряд алгоритмов блочного шифрования.

*Авторы: к.т.н. А.А. Семенов, к.т.н. О.С. Заикин, к.т.н. И.В. Отпущенников,  
С.Е. Кочемазов, к.ф.-м.н. А.С. Игнатьев.*

**10. Новый алгоритм построения графов, моделирующих развитие атак в компьютерных сетях.**

Сложность предложенного алгоритма есть  $O(n^2)$ , где  $n$  – число хостов в компьютерной сети. На базе этого алгоритма создана программная система генерации графов атак UnProVET (Unit Propagation Vulnerability Escalation Tool). В основе данной системы лежит пропозициональное кодирование алгоритма распространения атаки в компьютерной сети, результатом чего является булева формула, содержащая информацию о всех возможных атаках в сети. Вывод информации о сценариях атак из данной формулы и построение графа атак осуществляется при помощи простого правила распространения булевых ограничений (Unit Propagation rule). Новая программная система позволяет строить графы атак существенно более информативные, чем известная система MulVAL.

*Авторы: к.т.н. А.А. Семенов, Д.Е. Горбатенко, С.Е. Кочемазов.*