Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ СИСТЕМ И ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ
имени В.М. МАТРОСОВА
Сибирского отделения Российской академии наук

ЛЯПУНОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

27 октября – 1 ноября 2025 года

Материалы конференции



Иркутск – 2025

Научное издание

Материалы 41-й международной конференции «Ляпуновские чтения – 2025» (г. Иркутск, 27 октября – 1 ноября 2025 года). – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2025. – 434 с.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на 41-й международной конференции «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 27 октября – 1 ноября 2025 г.). Конференция организована с целью обсуждения актуальных результатов исследований научных сотрудников, аспирантов и студентов по математике, механике, теории управления, информационным и вычислительным технологиям. Для обсуждения результатов достижений в области современных подходов мониторинга и прогнозирования экологической обстановки в рамках конференции проводится специальная секция «Методы и технологии экологического мониторинга». В целях популяризации науки в рамках конференции проводится секция для юных исследователей. В 2025 году конференция приурочена к 50-летию создания коллектива и 45-летию со дня основания Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН (до 1997 года Иркутского вычислительного центра СО АН СССР).

Тематика конференции:
- Математическая теория управления
- Дифференциальные уравнения и математическая физика
- Математическое моделирование, системный анализ и оптимизация
- Информационно-вычислительные технологии
- Специальная секция «Методы и технологии экологического мониторинга»
- Специальная секция для школьников

Материалы конференции изданы в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

Pak Chol Hong, Choe Won, Kim Ye Bom. Incremental determination and matrix description of interval-mode concept lattice for stochastic Concept Analysis	12
C. Ryuk, J. C. Choe, J. H. Jo. Optimization analysis of graphene synthesis using laser induction	18
Chol Jin Kil, Song-Gyong Ri, Yun-Chol Kim. Fixed point results in triple-composed *s*-metric spaces and application to nonlinear integral equations	26
Chung Il Hyon, Chong Wi Hyon. Data-driven quality prediction of batch process using multi-output least square support vector regression with mixed kernel	29
Chung-Il Kim, Chong-Song Choe. Adaptive Sliding Mode Control of an Unmanned Surface Vehicle Based on NDOB	33
Ingtem J.G. 2D regularized spline	37
Myong Sim Kwon, Il Sin Kim, Kang Il Mun. Radar Signal Detection by Information Geometry Method in Signal Submanifolds	38
Sang Rim Kim, Hyon I Paek. Importance sampling based on subset simulation and scaling of PDF	43
Ri Sung Hyon, Kim Hyon A, Kim Kwang Hyok. Bivariate normal-geometric distribution with FGM copula	50
Yong Rim Ri, Kwang Song Han, Kwang Song Kim, Hyok Ri. Research on improving accuracy of electronic compass using improved ellipse fitting model	55
Kim Yun Gil, Paek Il Bom. A method using consistent reference preference relation in interval-valued hesitant fuzzy preference relation	61
Авраменко Ю. В., Фёдоров Р. К. Сравнение производительности локальной и распределенной файловых систем для обработки спутниковых снимков на примере расчета ndvi	66
Акентьева М. С., Каргаполова Н. А. Численные стохастические модели пространственно-временных полей биоклиматических индексов на Байкальской природной территории	67
Алакшин М.С., Парамонов В.В. Инструментальное программное средство для извлечения подлинных таблиц из HTML-документов	69
Ан С. Х., Ан С. С., Ли Х. В., Чон Г. С. Исследование о рациональном плане для разработки датчика портативного монитора ^{131}i в воздухе	71
Андрющенко В. С. Использование LLM для извлечения пар “ключ-значение” из документов: экспериментальное исследование на базе Qwen3-VL	72
Аникин А. С., Горнов А. Ю. , Кузьменко Е. Т., Кузьменко В. В. Методика факторного анализа на основе аппроксимации Шепарда	77
Аникин А. С., Горнов А. Ю. Этапы численного решения задачи безусловной оптимизации	79
Аникин А. С., Зароднюк Т. С. Нелокальный алгоритм поиска цифрового оптимального управления	82

Аникин А. С., Тятюшкин А. И. Параллельная вычислительная технология решения задач аппроксимации множества достижимости управляемых систем с переменным запаздыванием 83

Архинчеев В. Е., Бакланов М. Р., Хабитуев Б. В. Моделирование механических свойств low k диэлектрических материалов 85

Банщиков А. В. Об автоматизации динамического анализа неголономных механических систем 87

Боднюк М. Е., Карамов Д. Н., Яковлев Д. С., Применение брокеров сообщений в системе мониторинга 88

Воловиков Г. А. Графовый конструктор нейросетей 90

Воскобойников М. Л., Феоктистов А. Г., Еделев А. В., Использование инструментального комплекса FDE-SWFs для разработки и применения научных приложений 93

Гавенко О. Ю., Обершт С. Д., Автоматизация анализа поэтического текста: методология создания цифрового словаря лексических комбинаций 95

Гавенко О. Ю., Илющенко Ю. М. Цифровые технологии семантической разметки в автоматизированном анализе художественных текстов 97

Галиулина О. Е. Проектирование и реализация веб-платформы с игровыми механиками для подготовки и вовлечения участников предстоящего мероприятия 100

Гасников А. В. Горнов А. Ю., Модификация алгоритма Q-поиска для задачи минимизации порядкового оракула 101

Гаченко А. С. Интеграция разнородных данных для системы цифрового мониторинга Байкальской природной территории 102

Горнов А. Ю. Тестовая задача минимизации потенциала Морса сверхбольшой размерности в дискретной постановке 104

Горнов А. Ю. Трехсеточная технология сплайн-аппроксимации задачи оптимального управления 105

Горнов А. Ю. Факторы оценки сложности задачи унимодальной оптимизации 106

Горнов А. Ю., Сороковиков П. С. Методика рационального синтеза двухметодных алгоритмов безусловной минимизации 107

Грибанова И. А. Особенности пропозиционального кодирования задачи обращения хеш-функции MD4 109

Груздева М. С. Груздева Т. В. Об алгоритме локального поиска в задаче кластеризации k-means 110

Давыдов А. В., Нагул Н. В., Черкашин Е. А. Логическая среда для решения задач управления автономными мобильными роботами 112

Демиденко Г. В. Свойства решений систем дифференциальных и разностных уравнений с периодическими коэффициентами в линейных членах 113

Добрынина А. А. , Король С. А., Саньков В. А., Чечельницкий В. В., Брыжак Е. В. Микросейсмический «портрет» города 115

Дородных Н. О., Николайчук О. А., Столбов А. Б., Юрин А. Ю. Развитие и применение технологии модельных трансформаций для задач авиационной диагностики 118

Доронин С. В., Филиппова Ю. Ф. Концептуальная и численные модели процесса трамбования угольной шихты 121

Еделев Я. А. Программа оценки времени выполнения научного рабочего процесса по формулам с изменяющейся структурой 125

Ефимова Н. В., Горнов А. Ю., Зароднюк Т. С. Анализ заболеваемости Covid’19 для детей разных возрастных категорий с использованием модели Гурмана-Розенрауха 128

Жарков М. Л., Лемперт А. А., Супруновский А. В. О применении сетей массового обслуживания для моделирования перевалки грузов в универсальном морском порту 130

Зароднюк Т. С., Горнов А. Ю. Алгоритм поиска оптимального управления, основанный на нейронной модели Шепарда 131

Зароднюк Т. С., Горнов А. Ю. Двухволновой метод аппроксимации множества достижимости 133

Зорин Е. П., Пещерова С. М. Применение методов машинного обучения для анализа и интерпретации эффективности рекламных кампаний данных Яндекс.Директ 135

Игнатьев И. Н. Сравнительный анализ современных инструментов имитационного моделирования распределенных вычислений 139

Исполатов В. П., Пестова Ю. В., Николайчук О. А. Информационная система сбора и анализа заполненности средств размещения на основе данных туристических сайтов-агрегаторов 141

Иртегов В. Д. , Титоренко Т. Н. О некоторых результатах качественного анализа уравнений движения шара Чаплыгина с ротором 142

Казаков А. Л., Спевак Л. Ф. Теорема существования, точные и приближенные решения с нулевыми фронтами для многомерной параболической системы «хищник-жертва» 143

Карпенков М. А., Копылов Д. Е. Алгоритмические методы восстановления порядка чтения документа 146

Квон Ун Ген, Чве Мен Су. Исследование численного приближения системы двухмерного интегрального уравнения Фредгольма с использованием многочлена Бернштейна 148

Ким Ен Су, Ю Хун, Хон Кан Хек, Пак Се Ян. Один из способов определения доминирующих активных полюсов в управлении методом расположения полюсов 151

Ким Ен Хо, Хён Чжун, Ким Хак Чхор, Чве Кван Мен. Эвристика на основе генетического алгоритма для двухцелевого планирования двухфазного процесса сборки с совместимостью машины 153

Ким Сын Рёл, Чо Сон Бом, Ли Сон Нам. Исследование проектных параметров для улучшения эффективности сбора аэрозольного гранулометрического анализатора 157

Ким Хак Чхор, Ким Ен Хо, Ли Ын Сим. Модель планирования для минимизации потребления энергии в химической промышленности с использованием многоцелевого реактора 163

Ким Чхоль Гук, Ли Ын Сим, Чой Гван Мен. Исследование определения параметров реакции с помощью моделирования 166

Ким Юн Ми, Ли Кван, Чве Мен Су. Решение матричного уравнения Янга-Бакстера для матрицы с тремя различными собственными значениями 169

Климонов М. С. Внедрнение базовых методов для последовательной рекомендации веб-сервисов для геопортала 171

Кобозев В. Ю., Истомин А. Л., Колмогоров А. Г., Кривов М. В. Применение оптимального управления на стадии нагрева реакционной смеси в периодическом реакторе полимеризации стирола 173

Кондратьев В. С., Грибанова И. А. Применение адаптивной декомпозиции на основе псевдобулевых интервалов для обращения MD4 175

Кондусова В. Б., Батраков Г. С. Автоматизация проектирования технологической оснастки 180

Конова Е. С. Разработка модульной архитектуры веб-конструктора образовательных игр с поддержкой плагинов и пользовательских сценариев 184

Косов А. А. Об устойчивости стационарных решений уравнений движения гиростата Горячева-Сретенского с нелинейным потенциалом в особом случае 185

Косов А. А., Семенов Э. И. Построение точных многомерных решений дифференциальных уравнений и систем с оператором Монжа-Ампера 187

Косогоров Д. Е. Концепция подхода повышения эффективности работы больших языковых моделей 189

Косьянов Н. О. О выборе начального приближения для метода потенциальных значений в эпидемических задачах распределения нагрузки медицинских учреждений 191

Кузнецов П. А. О граничной задаче с вырождением для нелинейной параболической системы в одной модели хемотаксиса 194

Кузьминых Р. А., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В., Сивцев Е. Е. Наземный и спутниковый мониторинг атмосферного загрязнения загородных территорий 195

Куклин С. Г., Иванова О. А., Аникин А. С., Горнов А. Ю. Вычислительно-аналитические методы анализа переходных процессов в сердечном ритме 196

Кучеров Д. А., Ломов В. П. О возможности нейтринной томографии объектов: вариации углов смешивания 197

Леженин А. А. , Рапута В. Ф. Закономерности загрязнения бенз(а)пиреном атмосферы городов Сибири 200

Лемперт А. А., Казаков А. Л., Жарков М. Л. О моделировании движения поездов по горно-перевальному участку Транссибирской магистрали в районе озера Байкал 202

Ли Чон Хек, Хвань Чхоль Хен, Ким Чан Хак, Чон Юн Ген. Изучение экстракции интересов пользователя на основе методов извлечение веб-данных 203

Лунина М. А. Разработка модели данных и макета веб-приложения для базы геолого-структурных данных 207

Лыхин С. А., Зароднюк Т. С. Применение оператора Шепарда в факторном анализе рисков развития заболеваний респираторного тракта 208

Малахова В. В. Моделирование разложения метангидратов, сформировавшихся в условиях покровного оледенения 210

Малков У. Х. Вычислительные эксперименты по численному решению гексаматричных игр 212

Марданшин В. М. Интеграция метрик инфраструктуры вычислительного кластера в гибридную систему мониторинга 213

Марков Ю. А., Маркова М. А., Марков Н. Ю. Тормозное излучение цветного плазмона в неабелевой плазме в рамках канонического подхода 215

Минарченко И. М. , Хамисов О. В. Моделирование взаимодействия энергокомпаний в нескольких регионах 219

Михеев М. А., Еделев А. В., Башарина О. Ю., Карамов Д. Н. Разработка сервис-ориентированного приложения оптимизации живучести энергетических комплексов 220

Мурин А. А., Пещерова С. М., Алексеева Н. Ю. Гибридная нейросетевая модель прогнозирования расходов медицинских препаратов с применением методов анализа временных рядов 221

Николаев Е. П. Мультиагентная архитектура системы поддержки DevOps применительно к научным приложениям в гетерогенной распределённой вычислительной среде 225

Новиков М. А. О рациональном применении способов прямого и неявного учитывания некоторых алгебраических равенств в механических системах 227

Орлов А. В. , Груздева Т. В. Задача конкуренции регионов при поставках электроэнергии 228

Орлов А. В. Тестирование локального и глобального поисков в двухуровневых задачах с равновесием на нижнем уровне 229

Охотин И. И. Распознавание заголовков таблиц на основе больших языковых моделей 232

Охотина М. С., Груздева Т. В., Ушаков А. В. Параллельный глобальный поиск в задаче кластеризации с частичным привлечением учителя 233

Пан Чхоль Хо, Ем Ен Ир. Математическое моделирование для прогнозирования долговечности материалов литиевых ионных батарей 235

Пантелеев И. В., Архинчеев В. Е., Хабитуев Б. В., Мальцев С. П., Дерюгин Д. Ф. Расчёт эффективной жесткости неоднородной сетки пружин 238

Парамонов В. В., Шигаров А. О. Формирование открытых данных на основе государственных докладов о состоянии и об охране окружающей среды на примере Байкальской природной территории 242

Пашинин А. А., Опарин Г. А., Богданова В. Г. Технология разработки композитных сервисов для решения задач качественного анализа булевых сетей 244

Пененко А. В., Русин Е. В., Пьянова Э. А., Емельянов М. К., Гочаков А. В., Пененко В.В. Исследование гибридных алгоритмов обратного моделирования на основе операторов чувствительности на региональных сценариях 247

Пестова Ю. В. , Николайчук О. А. , Юрин А. Ю. , Дородных Н. О. Информационная технология формирования оперативной карты рисков лесных пожаров для территории иркутской области 248

Петренко П. С. К вопросу о стабилизируемости дифференциально-алгебраических уравнений с гистерезисом 250

Печерский Д. А., Бернгардт О. И. Выявление источников воздушного загрязнения в местах городской застройки с помощью методов машинного обучения 251

Поддубный И. А. Концепция подхода ответов на вопросы по табличным данным на основе сжатого семантического представления таблиц 256

Поливач В. И., Лемницкий М. Л., Малышков С. Ю. Геофизический регистратор «МГР-02-16G» 257

Половьян А. Л., Куклин С. Г., Иванова О. А., Аникин А. С. Информационная база данных кардиологических исследований 258

Попова А. К. Прогнозирование динамики лесов с учетом изменения климата 259

Поснова А. С., Ярославцева Т. В. Разработка программного средства для численной оценки загрязнения городских территорий выбросами промпредприятий по данным точечных измерений 261

Пэ Чхоль Ун, Сон Чхон Ир, Чон Кун Хек, Ян Вон Чхор, Пак Ил Бем. Многоцелевая оптимизация параметров инжекционного процесса для уменьшения усадки и искривления с использованием Moldflow и дисперсионного анализа 263

Ракишев А. А., Хмельнов А. Е., Шигаров А. О. Сравнение больших языковых моделей на задаче трансформации табличных данных 266

Рапута В. Ф., Леженин А. А., Кузьминых Р. А. Оценивание динамических и тепловых характеристик дымовых выбросов ТЭЦ с использованием спутниковой информации 269

Ри Юн Сик, Ким Сон Чхор, Ян Вон Чхор. Оптимизация процесса осаждения для улучшения качества тонких пленок ZnO, приготовленных методом пиролиза распылением 271

Рюк Чхор, Юн Ок. Статистический анализ экспериментального дизайна LN(pw)⊗Ln(r z) в случае размещения контрольного фактора во внутреннем и внешнем ортогональном массиве 275

Самсонюк О. Н. Обобщенные решения ограниченной *p*-вариации в задачах импульсного управления 287

Самсонюк О. Н. Об обобщениях позиционного принципа минимума В.А. Дыхты 288

Свинин А. К. О счетном семействе дискретных уравнений со свойством 290

Свинина С. В. О подходах к численному решению линейных многомерных дифференциально-алгебраических систем первого порядка 292

Сон Ён Бом, Им Гум Рён, Ан Сон Чхор. Определение оптимальных параметров в интегрированном окислительном канале 294

Сороковиков П. С. О применении алгоритмов роевого интеллекта для решения задачи дискретной оптимизации потенциала Морса 298

Сороковиков П. С. Численное исследование свойств алгоритма ястребов Харриса для решения многоэкстремальных задач непрерывной оптимизации 301

Столбов А. Б., Фёдоров Р. К. Архитектура интеграции программных средств сценарного моделирования в цифровые сервисы геопортала ИДСТУ СО РАН 304

Столбов А. Б. Сценарии импорта данных для комплексного исследования окружающей среды на основе открытых стандартов моделирования 306

Стрекаловский А. С., Косьянов Н. О. Локальный поиск в невыпуклых задачах оптимального управления 308

Стрельников А. Н., Горнов А. Ю. Качественное исследование управляемой динамики «велосипедной» модели беспилотного автомобиля 311

Темникова И. В., Онучина Е. В., Зароднюк Т. С., Горнов А. Ю. Методика оценки рисков поражения респираторного тракта при гастроэзофагеальной рефлюксной болезни 315

Тимофеев Е. М. Автоматизация спектрального анализа на базе спектрометра Optosky под Linux 316

Тобола К. В. Концепция подхода семантического аннотирования столбцов таблиц на основе больших языковых моделей 319

Толстихин А. А. Стратегия управления формациями группы автономных мобильных роботов в среде с препятствиями 321

Трифонов Р. И., Копылов Д. Е. Сегментация регионов документов с использованием графовых нейронных сетей 322

Тятюшкин А. И. Многометодная оптимизация управляющих функций и параметров 324

Тятюшкин А. И. Многометодный алгоритм для поиска решения краевой задачи 326

Тятюшкин А. И., Горнов А. Ю. Нелинейный метод приведенного градиента для задач оптимального управления с фазовыми ограничениями 329

Фёдоров К. Р. Извлечение контекста из репозиториев кода на основе графовых представлений 332

Фёдоров Р. К., Попова А. К., Авраменко Ю. В. Анализ последовательности снимков Sentinel-2 для классификации сельскохозяйственных земель 334

Филиппова Ю. Ф., Доронин С.В. Приближенное подобие и возможности взаимного преобразования нагрузочных диаграмм тросовых виброизоляторов 336

Финогенко И. А. О функционально-дифференциальных уравнениях с разрывной правой частью 339

Хабитуев Б. В., Архинчеев В. Е., Мальцев С. П., Дерюгин Д. Ф. Численное моделирование диффузии частиц в связанных порах 341

Хам Сен Чхор, Ким Ми Сун, Ким Хе Сен, О Зун Бон. Исследование повышения скорости кодирования в диапазонной асимметричной системе счисления 344

Хамисов О. В. Методы параметрической оптимизации в задачах двухуровневого программирования 347

Ханхаев А. В., Архинчеев В. Е., Хабитуев Б. В., Мальцев С. П., Дерюгин Д. Ф. Исследование долговременных асимптотик выживаемости частиц при диффузии во фрактальной и прямоугольной областях 348

Хмельнов А. Е. Применение алгоритмов вычислений с произвольной точностью на числах с плавающей запятой при построении триангуляций Делоне с ограничениями 351

Хон Гван Хёк, Ким Су Ен. Каскадная система управления с управления использованием imc-pid и дискретного управления режимом скольжения, сочетающих структуру PFC 353

Цициашвили Г. Ш., Гаврилов А. Н., Осипова М. А. Приложение теории массового обслуживания к управлению вместимостью контейнерного склада 355

Чан Гван Су, Ли Чан Чхор, Ян Вон Чхор. Оптимизация ЧПУ(CNC)-ного точеного процесса сплава INCONEL 617 на основе оптимального метода TOPSIS-TAGUCHI 358

Чекан М. А. Визуальное программирование агентов на основе иерархических машин состояний 362

Чен Г. С., Ри Х. В., Бае В. С., Ан С. Х. Система обнаружения выбросов радиационных лучей окружающей среды в реальном времени с использованием технологии LoRa 363

Чжэ Рим Сим. Математическое моделирование насыпной структуры частиц порошков 367

Чи Ын Хэ, Со Ган Хо, Сон Чу Кан. Регулирование асинхронного двигателя без датчика скорости с использованием фильтра Калмана без аромата и контроля режима скольжения 370

Чистяков В. Ф., Чистякова Е. В. Применение метода наименьших квадратов для решения краевых задач для дифференицально-алгебраических уравнений в частных производных 373

Шигаров А. О. RegTab: развитие библиотеки для разработки прикладного программного обеспечения извлечения реляционных данных из редактируемых таблиц с произвольной структурой на основе паттернов 376

Шипицын М. Н., Фёдоров Р. К. Метод анализа схожести исходного кода на основе хэшей абстрактных синтаксических деревьев 379

Щурик М. В., Копылов Д. Е. Обучение представлений шрифтов 380

Энхбат Р., Горнов А. Ю., Сороковиков П. С. Технология численного исследования игровых моделей на основе редукции к задаче невыпуклой оптимизации 383

Юмашев Е. А. Сравнительный анализ сервис-ориентированных технологий для работы с метеоданными 385

Юн Ок, Ким Юн Чхор. Минимальный остаточный параллельный многорасщеплённый метод для системы линейных уравнений с неэрмитовской положительной определённой матрицей коэффициентов 386

Юрин А. Ю., Дородных Н. О. Таблицы решений: способ реализации баз знаний интеллектуальных ассистентов в задачах диагностики 390

Ясеновский И. С., Шигаров А. О. Развитие веб-приложения RegTab Online для извлечения данных из редактируемых таблиц с произвольной структурой на основе RTL-паттернов 392

СЕКЦИЯ «ЮНЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛИ»

Алексеенко Алёна. Урны, предупреждающие о переполнении 393

Балакин Артём, Браев Денис, Вотинцев Артём. Создание сайта турбазы на языке Python 395

Башкова Мария. Математическое моделирование поведения фирмы на рынке ценных бумаг 396

Болонина Ксения. Карманный инженер 400

Волков Владимир. Маятник Максвелла: нахождение момента инерции 402

Мясников Герман. Исследование факториальной системы счисления с параметром 405

Ерохина Мария. Защитная наоконная сеть с датчиком движения 406

Ефремов Л. А., Олешевец Е. А., Иванов Р. А. Бесшовный навигатор: разработка системы ориентации в зданиях и на прилегающих территориях 408

Зимин Михаил. Особенности электроимпульсной кристаллизации сплавов Ti50Ni25Cu25 с эффектом памяти формы 409

Калашникова Виталина, Чередниченко Анна. Мобильное приложение «Практика в АО «АНХК» 411

Мадзагирова Алина. Грузовой дрон: от идеи до воплощения 413

Новокрещенных Екатерина. Физика гитарных струн 415

Петров Артем. Влияние физических сил и конфигураций механизации крыла на аэродинамические характеристики воздушного судна 418

Яхутдинов Алексей. Методы решения функциональных уравнений 420

INCREMENTAL DETERMINATION AND MATRIX DESCRIPTION OF INTERVAL-MODE CONCEPT LATTICE FOR STOCHASTIC CONCEPT ANALYSIS

Pak Chol Hong, Choe Won, Kim Ye Bom
Faculty of Applied Mathematics, Kim Chaek University of Technology,
Pyongyang, DPR Korea
pch561020@star_co.net.kp

A generalized one-sided formal context is proposed for concept analysis with different truth-value structures of attributes, which requires that each attribute-value domain has a complete lattice structure. However, since the stochastic attribute-value domain usually has a lattice structure, a formal context in which the attribute-value domain has a lattice structure must be given. Also, to perform a stochastic concept analysis successfully, we need to define an interval-mode stochastic concept that simultaneously describes lower and upper bounds, as well as a stochastic concept that gives a lower or upper bound description of attributes. Therefore, we first discuss the formal context in which the attribute-value domain has a lattice structure and the interval-mode stochastic concept lattice that simultaneously describe the lower and upper bounds of the attributes, and then propose an efficient algorithm that performs the incremental determination and matrix description of the stochastic concept lattice sequentially.

1. Introduction

Formal Concept Analysis (FCA), proposed by Wille [9], is one of the major formalisms for knowledge extraction, reduction, representation, and analysis.

FCA is formulated on the basis of a formal context represented by a binary relation between a set of objects and a set of attributes. The entries of the binary relation of classical contexts consist of 1 or 0. However, in many realistic problems, truth value is not binary. Thus, Butka et al. [2], Halaš et al. [4] and Shao et al. [7] propose the "generalized one-sided formal concepts" in order to deal with different truth value structures of attributes. On the other hand, Diday et al. [3] proposed a general formula for the intent-extent mappings of a stochastic Galois lattice with random descriptors, but did not explicitly indicate the formal context in which the attribute-value domain has a lattice structure, the starting condition of stochastic concept analysis. And each individual attribute-value domain of the generalized one-sided formal context premised in [2, 4, 7] is a complete lattice, whereas the attribute-value domain of the stochastic concepts proposed in [3] is a lattice.

The intents of the generalized one-sided formal concept proposed in [2, 4] describes the lower bound of the attributes of objects belonging to the extent, and the intents of the generalized one-sided formal concept proposed in [7] describes the upper bound of the attributes of objects belonging to the extent. If we explicitly define the formal context in which the attribute-valued domain has a generic structure, the starting condition of stochastic concept analysis, and, on this basis, let the intents of stochastic concepts simultaneously describe the lower and upper bounds of attributes that objects belonging to the extent, then this interval-type stochastic concept will give a more precise attribute description than the previous formal concepts.

In the original work of FCA, Wille has suggested two basic problems, the determination and the description problems [9]. The determination problem has been widely discussed in many scientific works ever since, which leads to the development of many efficient algorithms. In general, we can divide these algorithms into two categories including batch algorithms [1, 6, 10] and incremental algorithms [8, 11, 12]. Among all

types of lattice construction algorithms, incremental algorithms have a unique advantage. Wille [9] mentioned that the most communicative description is given by Hasse diagrams. By the way, it is difficult to autonomously understand the hierarchy of the concepts from Hasse diagrams for any information retrieval software. Thus, Pak el al. [5] proposed methods of describing a hierarchy-matrix.

Therefore, our own concern is to study the efficient incremental algorithm that performs the operation of Galois connection only once for determining the internal-mode stochastic concept lattice and describes its hierarchy-matrix sequentially.

2. Lattice-descriptive formal context and its formal concepts

Definition 1 Let *G* be a set of *m* objects, $E = 2^G$ an object lattice, and let $(F, \leq)$ be an attribute lattice if F_j is a lattice for each $j \in M$ of the attribute itemset $M = \{1, \cdots, p\}$ and $F = \prod_{j \in M} F_j$. Let $R = \left(R_{ij}\right)_{|G| \times |M|}$, $R_{ij} \in F_j$ for all $i \in G$ and $j \in M$, and R_{ij} represent the degree in the lattice F_j in which the object $i \in G$ has the attribute *j*. And, let each object $i \in G$ have $Rv(i) = (R_{i1}, \cdots, R_{ip}) \in F$, which is called the description of *i*. Then (*G*, *M*, *F*, *R*) is called the lattice-descriptive context.

To consider the interval-mode concept analysis, we introduce the direct product $DF = \prod_{j \in M} (F_j^c \times F_j)$ corresponding to the lattice $F = \prod_{j \in M} F_j$ and denote for simplicity $DF = F^c \times F$. where F^c(F_j^c) is the dual lattice of F(F_j).Then, from the dual principle, we have the following proposition.

Proposition 1. For the direct product lattice $DF = \prod_{j \in M} (F_j^c \times F_j)$ corresponding to the lattice $F = \prod_{j \in M} F_j$, the partial ordering, infimum and supremum respectively as follows: For $(A_1, B_1), (A_2, B_2) \in DF$,

$$(A_1, B_1) \leq (A_2, B_2) \Leftrightarrow (A_1 \geq A_2 \text{ and } B_1 \leq B_2);$$

$$(A_1, B_1) \wedge (A_2, B_2) = (A_1 \vee A_2, B_1 \wedge B_2), \quad (A_1, B_1) \vee (A_2, B_2) = (A_1 \wedge A_2, B_1 \vee B_2).$$

Definition 2 Let (*G*,*M*,*F*,*R*) be a lattice-descriptive formal context. For $X \in 2^G$ and $A \in F$, a pair of mappings $^{\uparrow -}: 2^G \to F$ and $^{\downarrow -}: F \to 2^G$ are defined as follows:

$$X^{\uparrow -}(j) := \wedge_{i \in X} R_{ij}, \quad j \in M$$

$$A^{\downarrow -} := \left\{ i \in G \mid \forall j \in M, A(j) \leq R_{ij} \right\}$$

The pair $(^{\uparrow -}, ^{\downarrow -})$ called certainty *adjoint operators* is an antitone Galois connection between 2^G and F.

In a way, a pair of mappings $^{\uparrow +}: 2^G \to F$ and $^{\downarrow +}: F \to 2^G$ are defined for $X \in 2^G$ and $B \in F$ as follows:

$$X^{\uparrow +}(j) := \vee_{i \in X} R_{ij}, \quad j \in M$$

$$B^{\downarrow +} := \left\{ i \in G \mid \forall j \in M, B(j) \geq R_{ij} \right\}$$

Then the pair $(^{\uparrow +}, ^{\downarrow +})$ called possibility *adjoint operators* is an isotone Galois connection between 2^G and F.

Definition 3. Let (*G*,*M*,*F*,*R*) be a lattice-descriptive formal context. For $X \in 2^G$ and $A \in F$, the concept induced by the certainty adjoint operators $(^{\uparrow -}, ^{\downarrow -})$, i.e., $\langle X, A \rangle$ with $X^{\uparrow -} = A$ and $A^{\downarrow -} = X$, is called the certainty concept. Here, *X* and *A* are called the *extent* and the *intent* of the certainty concept $\langle X, A \rangle$ respectively. We denote by $\boldsymbol{B_c}(G,M,F,R)$ the set of

all the certainty concepts of (G,M,F,R) , i.e., $\boldsymbol{B_c}(G,M,F,R)= \{\langle X,A\rangle \in 2^G \times F: X=A^{\downarrow -}, A=X^{\uparrow -}\}$. On the other hand, the concept induced by the probability adjoint operators $(^{\uparrow +}, ^{\downarrow +})$, namely, $\langle X,B\rangle$ with $X^{\uparrow +}=B$ and $B^{\downarrow +}=X$, is called the probability concept. Here, X and B are called the *extent* and the *intent* of the possibility concept $\langle X, B\rangle$ respectively. The set of all possibility concepts of (G,M,F,R) is denoted by $B_p(G,M,F,R)$, i.e., $B_p(G,M,F,R)=\left\{\langle X,B\rangle \in 2^G \times F: X=B^{\downarrow +}, B=X^{\uparrow +}\right\}$.

On $B_c(G,M,F,R)$ for any $\langle X_1,A_1\rangle, \langle X_2,A_2\rangle \in B_c(G,M,F,R)$, the partial order $\leq$ is defined as follows: $\langle X_1,A_1\rangle \leq \langle X_2,A_2\rangle \Leftrightarrow X_1 \subseteq X_2$ $(\Leftrightarrow A_1 \geq A_2)$. Then $B_c(G,M,F,R)$ with the partial order $\leq$ forms a lattice (called a *certainty concept lattice* (CCL) and denoted by $L_c(G,M,F,R)$) in which infimum and supremum can be described as

$$\bigwedge_{i\in I}\langle X_i,A_i\rangle = \left\langle \bigcap_{i\in I} X_i, \left(\bigcap_{i\in I} X_i\right)^{\uparrow -} \right\rangle = \left\langle \bigcap_{i\in I} X_i, \left(\bigvee_{i\in I} A_i\right)^{\downarrow -\uparrow -} \right\rangle$$

$$\bigvee_{i\in I}\langle X_i,A_i\rangle = \left\langle \left(\bigwedge_{i\in I} A_i\right)^{\downarrow -}, \bigwedge_{i\in I} A_i \right\rangle = \left\langle \left(\bigcup_{i\in I} X_i\right)^{\uparrow -\downarrow -}, \bigwedge_{i\in I} A_i \right\rangle$$

On $B_p(G,M,F,R)$ equipped with the partial order $\leq$ forms a lattice (called a *possibility concept lattice* (PCL) and denoted by $L_p(G,M,F,R)$) in which infimum and supremum can be described as

$$\bigwedge_{i\in I}\langle X_i,B_i\rangle = \left\langle \bigcap_{i\in I} X_i, \left(\bigcap_{i\in I} X_i\right)^{\uparrow +} \right\rangle = \left\langle \bigcap_{i\in I} X_i, \left(\bigwedge_{i\in I} B_i\right)^{\downarrow +\uparrow +} \right\rangle$$

$$\bigvee_{i\in I}\langle X_i,B_i\rangle = \left\langle \left(\bigvee_{i\in I} B_i\right)^{\downarrow +}, \bigvee_{i\in I} B_i \right\rangle = \left\langle \left(\bigcup_{i\in I} X_i\right)^{\uparrow +\downarrow +}, \bigvee_{i\in I} B_i \right\rangle$$

Definition 4. Let (G,M,F,R) be a lattice-descriptive formal context. A pair of mappings $^{\uparrow +}_{-}: 2^G \to DF$ and $^{\downarrow +}_{-}: DF \to 2^G$ are defined for $X \in 2^G$ and $(A,B) \in DF$ as follows:

$$X^{\uparrow +}(j) := \left(\bigwedge_{i\in X} R_{ij}, \bigvee_{i\in X} R_{ij}\right), \quad j \in M \quad , \quad (A,B)^{\downarrow +} := \left\{i \in G \mid \forall j \in M, A(j) \leq R_{ij} \leq B(j)\right\}$$

The pair $(^{\uparrow +}_{-}, ^{\downarrow +}_{-})$ is the interval-mode adjoint operators; where the mapping $^{\uparrow +}_{-}$ assigns lower bounds and the upper bounds of attributes of objects in the set X and the mapping $^{\downarrow +}_{-}$ the set of objects in which there is the description of each object between lower bound A and the upper bound B.

Theorem 1. Let (G,M,F,R) be a lattice-descriptive formal context. Then the interval-mode adjoint operators $(^{\uparrow +}_{-}, ^{\downarrow +}_{-})$ is an isotone Galois connection between 2^G and DF which holds the following properties.

(1) For all $X_1, X_2 \subseteq G, X_1 \subseteq X_2 \Rightarrow X_1^{\uparrow +} \leq X_2^{\uparrow +}$.

(2) For all $(A_1,B_1),(A_2,B_2) \in DF$, $(A_1,B_1) \leq (A_2,B_2) \Rightarrow (A_1,B_1)^{\downarrow +} \subseteq (A_2,B_2)^{\downarrow +}$.

(3) For all $X \subseteq G, X \subseteq X^{\uparrow +\downarrow +}$ and for all $(A,B) \in DF, (A,B) \geq (A,B)^{\downarrow +\uparrow +}$

(4) For all $X \subseteq G, X^{\uparrow +\downarrow +\uparrow +} = X^{\uparrow +}$ and for all $(A,B) \in DF, (A,B) \geq (A,B)^{\downarrow +\uparrow +\downarrow +} = (A,B)^{\downarrow +}$

(5) For all indexing set I,

$$\left(\bigvee_{i\in I} X_i\right)^{\uparrow +} = \bigvee_{i\in I} X_i^{\uparrow +} \text{ and } \left(\bigwedge_{i\in I}(A_i,B_i)\right)^{\downarrow +} = \bigwedge_{i\in I}(A_i,B_i)^{\downarrow +}$$

Definition 5. Let (G,M,F,R) be a lattice-descriptive formal context. The *interval-mode concept* is computed from the adjoint operators $(^{\uparrow^+_-},{}^{\downarrow^+_-})$; a pair $\langle X, (A,B)\rangle \in 2^G \times DF$ satisfying $X=(A,B)^{\downarrow^+_-}$ and $(A,B)=X^{\uparrow^+_-}$. Here, X and (A,B) are called the *extent* and the *intent* of the interval-mode concept $\langle X, (A,B)\rangle$ respectively. The extent X of the interval-mode concept $\langle X, (A,B)\rangle$ indicates the set of objects and the intent (A,B) the lower bounds and the upper bounds of the description range of objects in the extent.

Corollary 1. For any $X \subseteq G$ and $(A,B) \subseteq DF$, $\langle X^{\uparrow^+_-\downarrow^+_-}, X^{\uparrow^+_-}\rangle$ and $\langle (A,B)^{\downarrow^+_-}, (A,B)^{\downarrow^+_-\uparrow^+_-}\rangle$ are interval-mode concepts.

Theorem 2. When (G,M,F,R) is a lattice-descriptive formal context, if we define the partial ordering as $\langle X_1, (A_1,B_1)\rangle \le \langle X_2, (A_2,B_2)\rangle \Leftrightarrow X_1 \subseteq X_2$ (or $(A_1,B_1) \le (A_2,B_2)$) in the set $IB(G, M, F, R)$ of all interval-mode concepts, then $IB(G, M, F, R)$ is a lattice (called a *interval-mode concept lattice* (ICL) and denoted by $IL(G, M, F, R)$) in which infimum and supremum are the following for any index set I.

$$\bigwedge_{i\in I}\langle X_i,(A_i,B_i)\rangle = \left\langle \bigwedge_{i\in I} X_i, \left(\bigwedge_{i\in I}(A_i,B_i)\right)^{\downarrow^+_-\uparrow^+_-} \right\rangle,$$

$$\bigvee_{i\in I}\langle X_i,(A_i,B_i)\rangle = \left\langle \left(\bigvee_{i\in I} X_i\right)^{\uparrow^+_-\downarrow^+_-}, \bigvee_{i\in I}(A_i,B_i) \right\rangle.$$

Theorem 3. Let (G,M,F,R) is a lattice-descriptive formal context. If $\langle X,A\rangle \in L_c(G,M,F,R)$ and $\langle Y,B\rangle \in L_p(G,M,F,R)$ then the following holds.

(1) $X=Y \Rightarrow \langle X,(A,B)\rangle \in IL(G,M,F,R)$

(2) $X \neq Y \Rightarrow \langle X,(A,\vee_{i\in X} R_{ij})\rangle \in IL(G,M,F,R)$ and $\langle Y,(\wedge_{i\in Y} R_{ij},B)\rangle \in IL(G,M,F,R)$.

3. Building a concept lattice and its hierarchy-matrix

Since HM proposed by Pak et al. [5] is built on the basis of linear ordering with the hierarchy, it corresponds uniquely to a concept lattice regardless of the generating way. Thus, we will call this HM as the canonical HM and denote it by CHM.

In our paper, we consider the hierarchy-matrix related to the generating way of a concept lattice $L(K)=\{u_1,\cdots,u_r\}$ in which the concept number is the generating number.

For each generated interval-mode concept $C_i \in IL(G,M,F,R)$, we introduce the *lower neighbor card* of it and denote it by $LNC(i)$, which is the set {the concept-number of a lower neighbor of the i-th concept}.

Algorithm ICLHM. (Building ICL and its HM)

Input: a lattice-descriptive formal context (G,M,F,R).

Output: the interval-mode concept lattice lattice IL, the hierarchy-matrix $H=(h_{ij})$.

Initial state: $IL=\varnothing$, $IB_E=\varnothing$, $IB_I=\varnothing$ // IB_E// IB_E is the set of extents, IB_I the set of intents.

① Create $DF=\prod_{j\in M}(F_j^c \times F_j)$ and

$$(A_1,B_1)=\left((\sup_i R_{i1},\cdots,\sup_i R_{ip}),(\inf_i R_{i1},\cdots,\inf_i R_{ip})\right).$$

② $IB_I \leftarrow \{(A_1,B_1)\}$; $X_1=\varnothing$; $IB_E \leftarrow \{X_1\}$; $LNC(1) \leftarrow \varnothing$; $k \leftarrow 1$: // k is the generating number.

③ **if** $G \neq \varnothing$ **then**

④ Select $i \in G$

⑤ **for** $l = 1, \cdots, |IB_I|$, **do**

(a) Compute $A_0=A_l \wedge Rv(i)$, $B_0=B_l \vee Rv(i)$:

(b) **if** there is $(A_{l'}, B_{l'}) \in IB_I$ with $(A_0, B_0) = (A_{l'}, B_{l'})$ **then**

(c) $X_{l'} \leftarrow X_{l'} \cup X_l \cup \{i\}, X_{l'} \in IB_E$;
$LNC(l') \leftarrow \emptyset$; $LNC(l') \leftarrow \{l\}$

(d) **else**

(e) $(A_{k+1}, B_{k+1}) \leftarrow (A_0, B_0)$;
$X_{k+1} \leftarrow X_l \cup \{i\}$; $LNC(k+1) \leftarrow \{l\}$;
$IB_I \leftarrow IB_I \cup \{(A_{k+1}, B_{k+1})\}$;
$IB_E \leftarrow IB_E \cup \{X_{k+1}\}$; $k \leftarrow k + 1$:

(f) **end if**

⑥ **end for**.

⑦ $G \leftarrow G \backslash \{i\}$:

⑧ **end if**

⑨ $r \leftarrow k$: // r is the total of IL.

⑩ **for** each $l \in [1,r]$ **do**

⑪ $IL \leftarrow IL \cup \{\langle X_l, (A_l, B_l)\rangle : X_l \in IB_E, (A_l, B_l) \in IB_I\}$:

⑫ **end for**

⑬ Subnodes(H)

[Function Subnodes(H)]. (Describing HM)

Input: r, $\{LNC(i)\}$, IB_E // r is the total of IL, $\{LNC(i)\}$ is the group of lower neighbor cards, IB_E is the set of extents.

Output: the hierarchy-matrix $H=(h_{ij})$

① Take a unit matrix $H=(h_{ij})_{r\times r}$.

② **for** i=1,…,r-1 **do**

③ **for** $j=i+1,\ldots, r$ **do**

④ **if** $LNC(i)=\{j\}$ **then**

⑤ h_{ij}=-1; h_{ji}=1;

⑥ **else**

(a) if $A_i \supset A_j$ and $\exists$ no l such that $A_i \supset A_l \supset A_j$ then h_{ij}=-1; h_{ji}=1:

(b) if $A_i \subset A_j$ and $\exists$ no l such that $A_i \subset A_l \subset A_j$ then h_{ij}=1; h_{ji}=-1:

⑦ **end if**

⑧ **end for**

⑨ **end for**

Given a lattice-descriptive context, Algorithm LHM performs the generation of an interval-mode concept lattice and the description of its HM efficiently. The maximum time complexity of Algorithm ICLHM excect for subnodes(H) describing HM is $O(|DF|)$.

Theorem 4. If $IL = \{\langle X_k, (A_k, B_k)\rangle : X_k \in IB_E, (A_k, B_k) \in IB_I, k = \overline{1,r}\}$ is generated by Algorithm ICLHM, it is the set of all interval-mode concepts of a generalized one-sided formal context (G, M, F, R). That is:

(1) $(A_k,B_k) \in IB_I \Rightarrow (A_k,B_k)^{\downarrow^+_-} \in IB_E$ and $X_k \in IB_E \Rightarrow X_k^{\uparrow^+_-} \in IB_I$;

(2) $\langle X,(A,B)\rangle \in IL_{(G,M,F,R)} \Rightarrow X \in IB_E$, $(A,B) \in IB_I$;

(3) $X_k \in IB_E, (A_k,B_k) \in IB_I \Rightarrow \langle X_k,(A_k,B_k)\rangle \in IL_{(G,M,F,R)}$.

Remark 1. By Algorithm ICLHM, we can find a lower neighbor concept of each interval-mode concept newly-generated during generating the extent.

4. Conclusions

We have propose in this paper the certainty concept lattice, the possibility concept lattice and the interval-mode concept lattice of lattice-descriptive formal context for stochastic concept analysis. In this paper, we have obtained the following statements.

(1) On a given a lattice-descriptive formal context, the certainty concept lattice is generated by certainty-valued operators, which is an antitone Galois connection, and the possibility concept lattice and the interval-mode concept lattice are generated by the possibility adjoint operators and the interval-mode adjoint operators which are the isotone Galois connections, respectively.

(2) The interval-mode concept has close relation between the certainty concepts and the possibility concepts (Theorem 3).

(3) We have proposed the efficient incremental algorithm to solve the determination problem and the hierarchy-matrix description problem at once, which constructs the extent of all concepts on the basis of union operations without Galois operation and finds a lower neighbor concept of some concepts generating them (Theorem 4 and Remark 1).

Acknowledgements

We thank the members of the organizational committee for making the conference fruitful and exciting.

1. Andrews S, A ‘Best-of-Breed’ approach for designing a fast algorithm for computing fixpoints of Galois Connections, Information Sciences 295 (2015) 633–649.
2. Butka P., Pócs J., Generalization of one-sided concept lattices, Computing and Informaics, 32(2) (2013) 355–370.
3. Diday S E., Emilion R, Maximal and stochastic Galois lattices, Discrete Applied Mathematics 127 (2003) 271–284
4. Halaš R., Pócs J., Generalized one-sided concept lattices with attribute preferences, Information Sciences 303 (2015) 50–60.
5. Pak C.-H., Kim J.-H., Jong M.-G., Describing hierarchy of concept lattice by using matrix, Information Sciences 542 (2021) 58–70.
6. Outrata J., Vychodil V., Fast algorithm for computing fixpoints of Galois connections induced by object-attribute relational data, Information Sciences 185 (2012) 114–127.
7. Shao M.-W., Li K.-W., Attribute reduction in generalized one-sided formal contexts, Information Sciences 378 (2017) 317–327.
8. Valtchev P., Missaoui R., Godin R., A framework for incremental generation of closed itemsets, Discrete Applied Mathematics, 156(6), (2008)924–949.
9. Wille R., Restructuring the lattice theory: an approach based on hierarchies of concepts, In: I. Rival (Ed.), Ordered Sets, Reidel, Dordrecht, Boston, 1982, pp. 445–470.
10. Zhang Z., Constructing L-fuzzy concept lattices without fuzzy Galois closure Operation, Fuzzy Sets and Systems 333 (2018) 71–86.
11. Zou L.-G., Zhang Z.-P, Long J., A fast incremental algorithm for constructing concept lattices, Expert Systems with Applications 42 (2015) 4474–4481.
12. Zou L.-G., Zhang Z.-P., Long J., Zhang H., A fast incremental algorithm for deleting objects from a concept lattice, Knowledge-Based Systems, 89 (2015) 411–419.

OPTIMIZATION ANALYSIS OF GRAPHENE SYNTHESIS USING LASER INDUCTION

C. Ryuk[1], J. C. Choe[1], J. H. Jo[2],
[1]Faculty of Applied Mathematics, Kim Chaek University of Technology,
Pyongyang, DPR Korea
[2]Faculty of Physical Engineering, Kim Chaek University of Technology,
Pyongyang, DPR Korea
rch61117@star-co.net.kp

Graphene has been widely applied in many fields due to its excellent electrical and mechanical properties. And the conventional graphene fabrication methods have all their own disadvantages, but the laser-induced graphene has a wide research prospect because it can directly convert the base material into conductive graphene, the process is very simple, environment-friendly, and quality control by precisely controlling the correlation parameters. However, at present, the influence of laser parameters on the quality of synthetic graphene has not been fully investigated. Therefore, in this paper, the experiment design for laser-induced graphene is developed, and the surface temperature of polyimide material is measured and analyzed using COMSOL6.2 for each experimental design to determine the significance of the laser parameters and their optimum conditions. And the temperature field simulations are carried out to verify whether the calculated optimum parameters are optimal.

1. Introduction

Recently, graphene has been widely used and studied in many fields, including electronics, materials engineering, and aerospace engineering, due to its excellent electrical conductivity and mechanical properties. Graphene is a planar thin-film 2D nano-material with a thickness of about one carbon atom. Among them, the carbon atoms inside are arranged in sp2 hybrid orbitals and exhibit hexagonal honeycomb crystalline shape [1]. Graphene was simply a virtual substance that could not exist stably alone, as suggested by scientists. However, in 2004, the British Manchester University physicist Andrei Haim and Constantin Novoshovton succeeded in separating graphene from graphite through experiments, proving that it can exist alone [1, 2].

Graphene fabrication methods include mechanical exfoliation, silicon carbide epitaxy, chemical vapor deposition, ultrasonic dispersions, and redox methods, all of which have certain disadvantages such as low fabrication efficiency, complex production processes, high fabrication efficiency, and low quality although the process is simple [3-7]. However, laser-induced graphene synthesis can convert polyimides directly to conductive graphene on the surface of the material, with the usual laser platform [8-11]. And using this method, it is possible to simplify the flow process for graphene synthesis, protect the environment, and precisely control the correlation parameters affecting the polyimide surface temperature by computer, thus improving the quality of graphene and its mass production [12-15].

2. Theoretical model for laser-pumped polyimide

It is believed that photothermal reactions mainly occur when laser pumping of the polyimide surface. Photothermal reactions are also closely related to the temperature field distribution, so the study of temperature field distribution and temperature variation in the study of laser-induced polyimide excitation is of great significance.

2.1 Laser heat source model

The laser device used in the experiment is a gas laser device with a working material of 10.64μm CO_2. The detailed performance parameters are shown in **Table 1**.

For a uniform surface heat source, the power density expression of the laser beam is

$$P(x,y)=\frac{P}{\pi r^2} \quad (1)$$

.

For the surface heat source of the disproportionate distribution, the power density expression of the laser beam is close to the Gaussian distribution:

$$P(x,y)=\frac{2P}{\pi r_0^2}\times\exp\left\{-\frac{2}{r_0^2}\times\left[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right]\right\} \quad (2)$$

Here P represents the laser power, r_0 the laser spot radius, x_0 and y_0 represent the center position of the laser spot, respectively.

Table 1 – Basic parameters of laser device

Parameters	Values
Wavelength, μm	10.64
Maximum power, W	30
Laser spot diameter, mm	4
Repetition frequency, kHz	5
Pulse width, μs	120
Laser energy wave, %	5

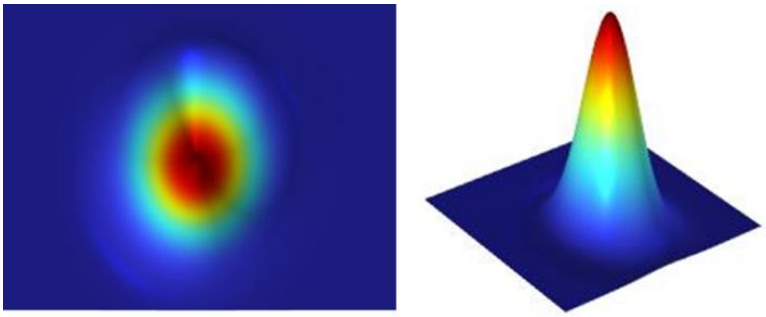


Fig. 1. Laser power density with Gaussian distribution

2.2 Mathematical model of the temperature field of laser-pumped polyimide

2.2.1 Heat transfer

The process of laser-pumped polyimide is a very typical transient nonlinear heat conduction process, and heat transfer occurs depending on the free electron transfer inside the object. According to Fourier's law and energy conservation law, the temperature control equation is

$$\rho C_P\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q. \quad (3)$$

Here

ρ : density of material (kg/m^3),

C_p: specific heat capacity of material (J/(kg·K)),

k : coefficient of heat conduction (W/(m·K)),

T : distribution function of temperature field (K),

t : heat transfer time (s),

Q : heat absorbed by the material (W/m^3).

2.2.2 Heat convection

It is derived based on Newton's law of cooling:

$$Q_c = h(T_2 - T_1)A. \quad (4)$$

Here

Q_c: the heat value of heat conduction (W/m^3),

h : the coefficient of heat conduction (W/(K·m^2)),

T_2 : the heat-transfer temperature (K),

T_1 : the hot-body temperature (K),

A : heat exchange area (m^2).

2.2.3 Boundary and initial conditions

Initial condition at the top surface is

$T(x, y, z, 0) = T_0$.

Boundary condition at the top surface is

$$-k\frac{\partial T}{\partial z}|z = 0 = q - 2h(T - T_0).$$

On the other hand, the boundary conditions on the other surfaces can be considered as follows.

$$-k\frac{\partial T}{\partial z}|z = 0 = -2h(T - T_0).$$

Therefore, the heat transfer equation for irradiating the polyimide surface by laser under normal synthesis conditions is

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = k\left(\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2}\right) - h(T - T_0) + \\ + \frac{2P}{\pi r_0^2} \times \theta \times exp\left\{-\frac{2}{r_0^2} \times [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\}. \quad (5)$$

3. Calculation of optimal parameters for graphene synthesis

The laser power, the relative scanning speed of the laser beam, and the laser spot size all affect the process of photothermal reaction and the temperature field distribution of the material, and finally the laser-induced graphene synthesis. Therefore, the experimen tal design method was used to analyze the temperature field at the level of parameters to calculate the optimum parameters affecting graphene synthesis.

3.1 Experimental design

Since graphene is formed when the surface temperature of the polyimide material reaches the decomposition temperature 550℃, we set the experi-mental design problem to target this value and calculate its optimal parameters. The levels of laser power, relative scanning speed of laser beam and material, and laser spot size are set as shown in **Table 2**.

Also, as shown in **Table 3**, the orthogonal table $L_{16}(4^5)$ is set up and the surface temperature values (Y) for each experimental design are obtained using COMSOL6.2 at three locations. The characteristics of the laser device used in the experiments are shown in **Table 1**. Here A is the laser power, B is the relative travel speed of the laser beam and material, C is the laser spot size, and Y_1 is the surface temperature value Y minus the decomposition temperature of the polyimide material 550℃, that is, Y_1=Y-550.

3.2 Analysis of variance

From **Table 3**, the sum of the Y_1 values according with each factor level is found, as shown in **Table 4**.

From **Tables 3** and **4**, when the total variance and the variance of each factor are calculated, the ANOVA table is shown in **Table 5.** As shown in **Table 5**, the laser power,

the relative scanning speed of the laser beam, and the laser spot size affect the material surface temperature.

Table 2 – Levels of parameters

Factor	1	2	3	4
A, W	10	12.5	15	17.5
B, mm/s	4	6	8	10
C, mm	1.6	1.8	2	2.2

Table 3 – Experimental design by orthogonal table L16(45)

№	A	B	C	e	e	Y, ℃			Y_1, ℃			Sum
	1	2	3	4	5							
1	1	1	1	1	1	677.65	694.13	700.99	127.65	144.13	150.99	422.77
2	1	2	2	2	2	604.76	601.93	595.12	54.76	51.93	45.12	151.81
3	1	3	3	3	3	527.79	526.77	525.65	-22.21	-23.23	-24.35	-69.79
4	1	4	4	4	4	473.93	472.78	472.81	-76.07	-77.22	-77.19	-230.48
5	2	1	2	3	4	782.77	806.44	810.32	232.77	256.44	260.32	749.53
6	2	2	1	4	3	760.31	755.92	759.11	210.31	205.92	209.11	625.34
7	2	3	4	1	2	549.29	549.74	550.86	-0.71	-0.26	0.86	-0.11
8	2	4	3	2	1	545.90	548.37	551.15	-4.10	-1.63	1.15	-4.58
9	3	1	3	4	2	782.78	827.87	838.06	232.78	277.87	288.06	798.71
10	3	2	4	3	1	647.76	653.83	651.63	97.76	103.83	101.63	303.22
11	3	3	1	2	4	759.94	761.78	768.03	209.94	211.78	218.03	639.75
12	3	4	2	1	3	640.98	646.12	649.60	90.98	96.12	99.60	286.70
13	4	1	4	2	3	801.01	842.46	854.95	251.01	292.46	304.95	848.42
14	4	2	3	1	4	773.45	769.65	774.61	223.45	219.65	224.61	667.71
15	4	3	2	4	1	755.38	759.96	762.96	205.38	209.96	212.96	628.30
16	4	4	1	3	2	762.14	761.32	763.52	212.14	211.32	213.52	636.98

Table 4 – Sum of Y1 values for level of factors

Factor	A	B	C
1	274.31	2819.43	2324.84
2	1370.18	1748.08	1816.34
3	2028.38	1198.15	1392.05
4	2781.41	688.62	921.05
Sum, *T*	6454.28		

Table 5 – ANOVA table

Factor	SS	df	MS	F_0	ρ, %
A	282397.80	3	94132.60	24.85	44.94
B	208358.13	3	69452.71	18.34	32.66
C	89639.65	3	29879.88	7.89	12.98
e_1	22726.06	6	3787.68	-	9.42
e_2	4273.26	32	388.48	-	-
Sum	3466.59	47	-	-	100

In addition, these factors are combined to affect the temperature of the material surface. Therefore, the interaction analysis of these three factors is carried out to calculate the optimum conditions affecting the temperature of the material surface. A binary table is constructed for the analysis of the interaction of each factor. Thus, the sum of the Y_1 values for each level of factors from **Table 3** is given in **Table 6**.

As can be seen from **Table 6**, the optimum level combinations are A_2B_3, A_2C_4, and B_3C_4 and thus, the optimum condition is $A_2B_3C_4$. That is, the optimum parameter values are Laser output (12.5W), Laser scanning speed (8mm/s) and Laser spot radius (2.2mm).

4. Simulation and validation of temperature field by optimal parameters

4.1 Simulation model setup

- Geometric dimension: The main type of base material is thin film and the thickness is relatively small, so the geometry of the substrate is set to 15 mm × 30 mm × 0.25 mm.
- Thermophysical parameters of material: The thermophysical properties of polyimide material are shown in **Table 7**.
- Initial and boundary conditions: Before laser irradiation, the material temperature is equal to the ambient temperature T_0 = 300K. The polyimide boundaries under laser irradiation are shown in **Fig. 2**. In Fig.2, boundary 1 is the laser excitation region, boundary 2, 3, 5 and 6 is mainly affected by air convection and boundary 4 is the region associated with the working interface that is not related to air convection.

Table 6 – Sum of Y1 values for each level of factors

Factor	A_1	A_2	A_3	A_4	Sum
B_1	422.77	749.53	798.71	848.42	2819.43
B_2	151. 81	625.34	303.22	667.71	1748.08
B_3	-69.79	-0.11*	639.75	628.30	1198.15
B_4	-230.48	-4.58	286.70	636.98	688.92
Sum	274.31	1370.18	2028.38	2781.41	6454.28
Factor	A_1	A_2	A_3	A_4	Sum
C_1	422.77	625.34	639.75	636.98	2324.84
C_2	151.81	749.53	286.7	628.30	1816.34
C_3	-69.79	-4.58	798.71	667.71	1392.05
C_4	-230.48	-0.11*	303.22	848.42	921.05
Sum	274.31	1370.18	2028.38	2781.41	6454.28
Factor	B_1	B_2	B_3	B_4	Sum
C_1	422.77	625.34	639.75	636.98	2324.84
C_2	749.53	151.81	628.30	286.70	1816.34
C_3	798.71	667.71	-69.79	-4.58	1392.05
C_4	848.42	303.22	-0.11*	-230.48	921.05
Sum	2819.43	1748.08	1198.15	688.92	6454.28

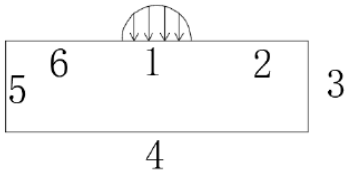


Fig. 2. Boundary of a polyimide.

Table 7 – Material properties of polyimide

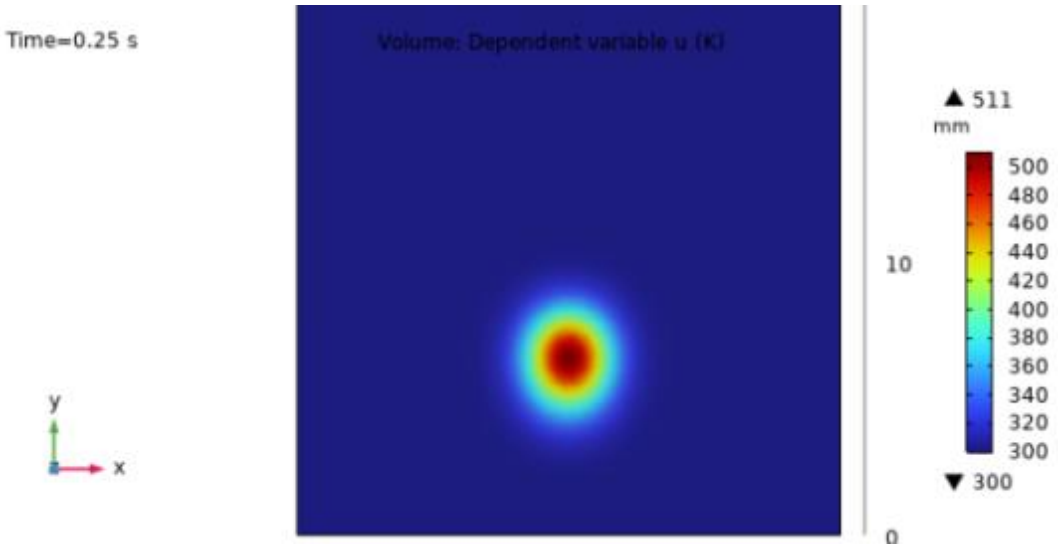
Factors	Value
Density, kg/m^3	1420
Thermal conductivity, J/(kg·K)	0.16
Specific heat, J/(kg·K)	1138
Pyrolysis temperature, K	823
Light energy conversion efficiency, %	13.7
Heat transfer coefficient, W/(K×m^2)	10

Then, using Eq. (5), the temperature distribution of the polyimide material is simulated when the laser is irradiated on the polyimide material.

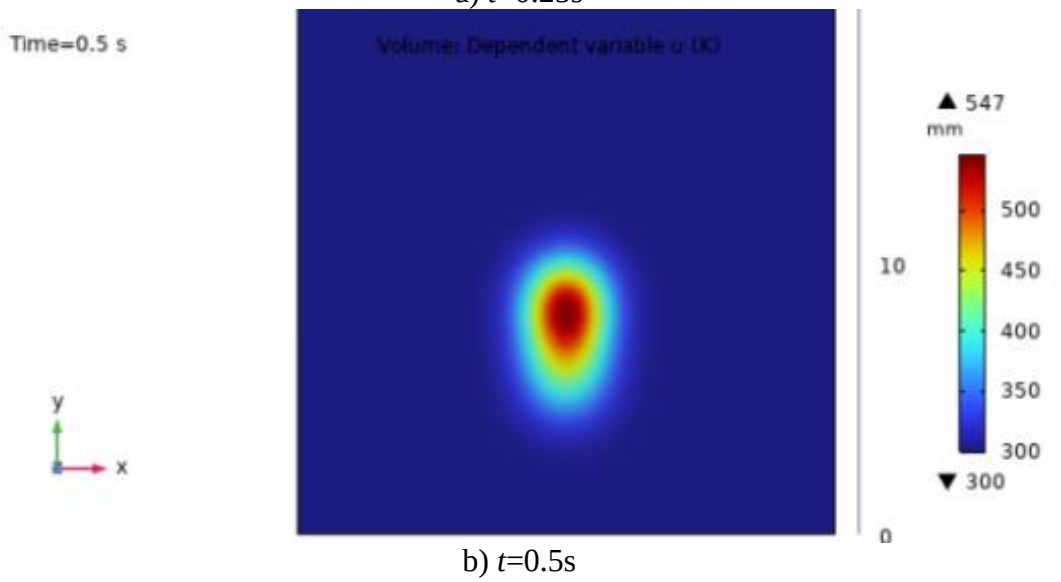
4.2 Simulation and optimal parameter validation

The simulation of the temperature field excited by the laser polyimide is carried out using the optimum parameters determined by the experimental design and the polyimide material properties. Then, we use the multiphysical analysis program COMSOL6.2 as the simulation program and implement the heat transfer equation of the laser-pumped polyimide surface in its partial differential equation module. The simulation results are **Fig. 3** and **Fig. 4**.

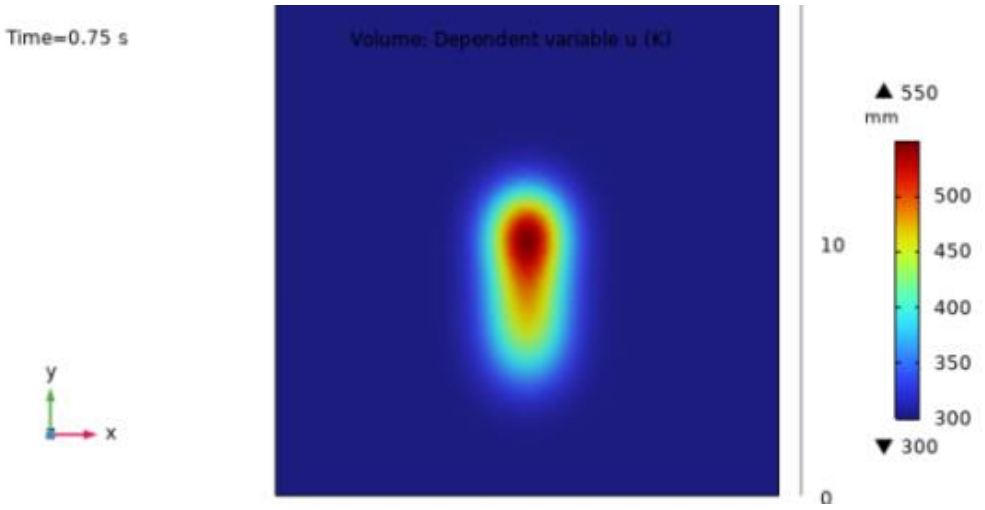
As can be seen in **Fig. 4**, the surface temperature of the polyimide material reaches exactly 550℃, the temperature of graphene synthesis after 0.5s.



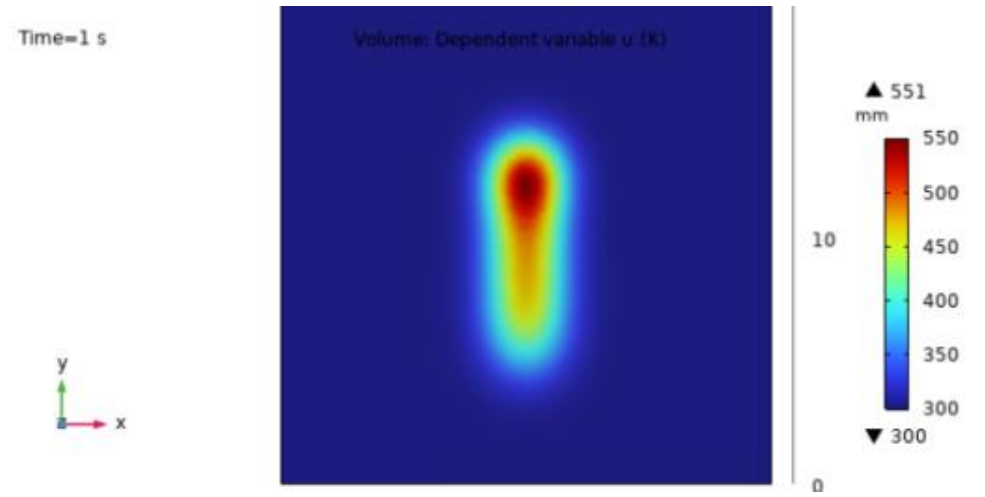
a) t=0.25s



b) t=0.5s



c) *t*=0.75s



d) *t*=1s

Fig. 3. Temperature distribution on polyimide surface with time.

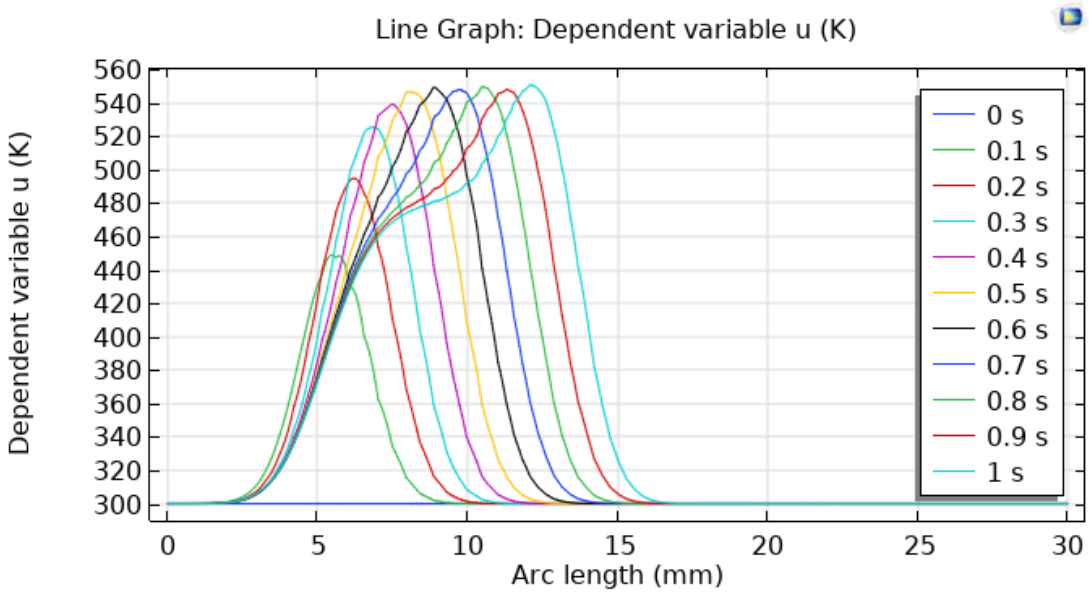


Fig. 4. Temperature distribution in the center of the light spot.

5. Result and discussion

As can be seen, the polyimide material surface temperature reaches exactly 550℃, the graphene synthesis temperature after 0.5s. The results show that the laser power reaches 550℃, the synthesis temperature at 12.5W, scan rate 8mm/s and spot radius of 2.2mm. On the other hand, from the Taguchi method, it can be seen that the surface temperature increases with increasing laser power, decreasing scanning speed and decreasing spot radius. If the surface temperature is too high, graphene cannot be synthesized due to surface carbonization, and if it is too low, graphene cannot be synthesized. Thus, determining the optimum power, scan rate and radius is very important for the efficiency and quality of graphene synthesis, and the Taguchi method is shown to be effective in solving this problem. On the other hand, simulation through mathematical modeling is also an essential step in achieving the goal at a lower cost.

6. Conclusions

Graphene synthesis using polyimide materials is a very interesting method for graphene synthesis due to its pollution and low cost, but the control of the reaction temperature of graphene synthesis is a very important issue because the control of the factors affecting this temperature is a delicate one. Thus, the correct synthesis temperature of 550℃ is a crucial guarantee for graphene synthesis. In this paper, the laser power density, scan rate and spot size in graphene synthesis using laser-induced polyimide were determined through Taguchi method and simulation. In the simulations with the determined parameters, the graphene synthesis temperature was accurately reached at 550℃. This paper will be an active contribution to graphene synthesis using polyimides.

1. Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al, 2004. Electric field effect in atomically thin carbon films, Science, 306(5696), 666-669.
2. Liu Z, Xu Q, Zhang C, et al, 2020. Laser-induced growth of large-area epitaxial graphene with low sheet resistance on 4H-SiC(0001), Applied Surface Science, 514.
3. Plutnar J, Pumera M, Sofer Z, 2018. The chemistry of CVD grapheme, Journal of Materials Chemistry C, 6(23), 6082-6101.
4. Reina A, Jia X, Ho J, et al, 2009. Large Area, Few-Layer Graphene Films, Nano Letters, 9(1), 30-35.
5. Li X, Cai W, An J, et al, 2009. Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils, Science, 324(5932): 1312-1314.
6. Kim K S, Zhao Y, Jang H, et al, 2009. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes, Nature, 457(7230), 706-710.
7. Hernandez Y, Nicolosi V, Lotya M, et al, 2008. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite, Nat Nanotechnol, 3(9), 563-568.
8. O'Neill A, Khan U, Nirmalraj P N, et al, 2011. Graphene Dispersion and Exfoliation in Low Boiling Point Solvents, The Journal of Physical Chemistry C, 115(13), 5422-5428.
9. Ciesielski A, Samori P, 2014. Graphene via sonication assisted liquid-phase exfoliation, Chem Soc Rev, 43(1), 381-398.
10. Liang A, Jiang X, Hong X, et al, 2018. Recent Developments Concerning the Dispersion Methods and Mechanisms of Graphene, Coatings, 8(1).
11. Tao L Q, Zhang K N, Tian H, et al, 2017. Graphene-Paper Pressure Sensor for Detecting Human Motions, ACS Nano, 11(9), 8790-8795.
12. Ye R, James D K, Tour J M, 2018. Laser-Induced Graphene, Acc Chem Res, 51(7), 1609-1620.
13. Ruan G D, Sun Z Z, Peng Z W, et al, 2011. Growth of Graphene from Food, Insects, and Waste, ACS Nano, 5(9), 7601-7607.
14. Chyan Y, Ye R, Li Y, et al, 2018. Laser-Induced Graphene by Multiple Lasing: Toward Electronics on Cloth, Paper, and Food, ACS Nano, 12(3): 2176-2183.
15. Ye R, James D K, Tour J M, 2019. Laser-Induced Graphene: From Discovery to Translation, Adv Mater, 31(1), e1803621.

FIXED POINT RESULTS IN TRIPLE-COMPOSED *S*-METRIC SPACES AND APPLICATION TO NONLINEAR INTEGRAL EQUATIONS

Chol Jin Kil, Song-Gyong Ri, Yun-Chol Kim
Faculty of Applied Mathematics, Kim Chaek University of Technology,
Pyongyang, DPR Korea
kcj9228@star-co.net.kp

Fixed point theory provides very powerful and effective tools in many scientific fields, such as nonlinear analysis, integral equations, differential equations, dynamical systems, etc. An interesting recent study on fixed point theory is the generalization of metric space (*MS*). Mathematicians have proposed a lot of generalizations of *MS* by changing the triangle inequality. First, mathematicians have proposed several notions such as *b*-metric space (*b-MS*) [1], extended *b-MS* [2], controlled metric type space (*CMTS*) [3], and triple controlled metric type space (*TCMTS*) [4], by using multiplication of constant or functions. And new concepts such as *p*-metric space (*p-MS*) [5] and triple-composed metric space (*TCMS*) [6] have also been introduced by using the composition of functions.

On the other hand, Sedghi et al. [7] in 2012 defined a new notion called *S*-metric space (*S-MS*), and recently, a number of works have extended the notion of *S-MS*.

Definition 1 ([7]). Let X be a non-empty set. The *S*-metric is a mapping $S: X^3 \to [0, \infty)$ such that:

$$\text{(S1) } S(x,y,z) = 0 \iff x = y = z;$$

$$\text{(S2) } S(x,y,z) \le S(x,x,u) + S(y,y,u) + S(z,z,u),\ \forall x,y,z,u \in X.$$

The pair (X, S) is called an S-MS.

Souayah and Mlaiki [8] and Rohen et al. [9] defined S_b-MS by changing (S2) using the idea of b-MS as follows:

(S_b2) $S_b(x,y,z) \le b[S(x,x,u) + S(y,y,u) + S(z,z,u)]$, where $b \ge 1$ is given constant.

And Mlaiki [10] and Mustafa et al. [11] proposed the notions of extended S_b-MS and S_p-MS as generalizations of S-MS and S_b-MS using the idea of extended b-MS and p-MS, respectively, in 2018 and 2019. In 2023, Ekiz Yazici et al. [12] and Gangwar et al. [13] obtained inspiration from the concept of CMTS and defined controlled S-metric-type space and controlled S-metric space, respectively. The idea of TCMTS also led to the emergence of a new concept of triple controlled S-metric type space (TC-S-MTS), which was proposed by Azmi [14]. More recently, Kil et al. [15] introduced a new concept called composed S-metric space (CS-MS) by changing (S2) using the composition of a function as follows:

(S_c2) $S_c(x,y,z) \le \mathcal{F}\big(S_c(x,x,u)\big) + \mathcal{F}\big(S_c(y,y,u)\big) + \mathcal{F}\big(S_c(z,z,u)\big)$, where $\mathcal{F}: [0,\infty) \to [0,\infty)$ is a strictly increasing continuous function with $\mathcal{F}(0) = 0$.

Based on the analysis of recent work on generalization of S-MS, we propose a new concept of triple-composed S-metric space (TCS-MS). Our main motivation is the concept of TCMS and CS-MS. TCS-MS is a new concept that uses the composition of three functions rather than the multiplication of three functions unlike the recently introduced TC-S-MTS. We claim that TCS-MS is another generalization of S-MS, S_b-MS and CS-MS. We also prove Banach-type fixed point theorem in TCS-MS. Finally, we apply obtained fixed point results to explore the solution of nonlinear integral equations.

We first introduce the concept and example of triple-composed S-metric space.

Definition 2. Let X be a non-empty set and $\mathcal{F}_i: [0,\infty) \to [0,\infty)$ (i=1, 2, 3) be strictly increasing continuous functions with $\mathcal{F}_1(0) = \mathcal{F}_2(0) = \mathcal{F}_3(0) = 0$. The triple-composed S-metric is a mapping $S_T: X^3 \to [0,\infty)$ such that $\forall x, y, z, u \in X$:

$$(S_T1)\ S_T(x,y,z) = 0 \iff x = y = z;$$

$$(S_T2)\ S_T(x,y,z) \le \mathcal{F}_1\big(S_T(x,x,u)\big) + \mathcal{F}_2\big(S_T(y,y,u)\big) + \mathcal{F}_3\big(S_T(z,z,u)\big).$$

The pair (X, S_T) is called a triple-composed *S*-metric space (*TCS-MS*).

Remark 1. Every S-MS is a TCS-MS with $\mathcal{F}_i(t) = t$ (i=1, 2, 3) for all $t \ge 0$, and every Sb-MS is a TCS-MS with $\mathcal{F}_i(t) = bt$, (i=1, 2, 3), $b \ge 1$ for all $t \ge 0$. And every CS-MS is a TCS-MS with $\mathcal{F}_1(t) = \mathcal{F}_2(t) = \mathcal{F}_3(t)$ for all $u \ge 0$. But its inverse is not necessarily true.

Example 1. Let (X, S_b) be an *S_b-MS* with $b \ge 1$, and let $S_T(x,y,z) = e^{S_b(x,y,z)} - 1$. Take $\mathcal{F}_i: [0,\infty) \to [0,\infty)$ (*i*=1, 2, 3) by

$$\mathcal{F}_1(t) = \mathcal{F}_2(t) = e^{4bt} - 1 \text{ and } \mathcal{F}_3(t) = e^{2bt} - 1, \text{ for all } t \ge 0.$$

Then (X, S_T) is a *TCS-MS* via $\mathcal{F}_1$, $\mathcal{F}_2$ and $\mathcal{F}_3$, neither an *S-MS* nor an *S_b-MS* nor a *CS-MS*.

A *TCS-MS* (X, S_T) is said to be symmetric if $S_T(x,x,y) = S_T(y,y,x)$ for all $x, y \in \mathrm{X}$.

Next, we establish the Banach-type fixed point result in the setting of *TCS-MS*.

Theorem 1. *Let (X, S_T) be a symmetric complete TCS-MS, and let $T: \mathrm{X} \to \mathrm{X}$ be a mapping satisfying*

$$S_T(Tx, Ty, Tz) \le k \cdot S_T(x,y,z),\ \forall x, y, z \in \mathrm{X}, \tag{1}$$

where $k \in [0,1)$. Then T has a unique fixed point.

Remark 2. In Theorem 1, taking $\mathcal{F}_i: [0,\infty) \to [0,\infty)$(i=1, 2, 3) as $\mathcal{F}_i(t) = bt$, $b \ge 1$ for all $t \ge 0$, Banach-type fixed point result in Sb-metric spaces is obtained. And taking $\mathcal{F}_i: [0,\infty) \to [0,\infty)$ (i=1, 2, 3) as $\mathcal{F}_i(t) = t$ for all $t \ge 0$, Banach-type fixed point result in S-metric spaces is obtained.

Finally, we apply Theorem 1 to explore the existence of solutions to Fredholm integral equations as follows

$$x(t) = \int_0^1 \mathcal{M}(t,s,x(s))ds,\ \forall t, s \in [0,1], \tag{2}$$

where $\mathcal{M}: [0,1] \times [0,1] \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ is a given continuous function.

Let $\mathrm{X} = \mathrm{C}([0,1], \mathbb{R})$. Define $S_T: \mathrm{X}^3 \to [0,\infty)$ by

$$S_T(x,y,z) = \sinh\big(\max_{t\in[0,1]}|x - z| + \max_{t\in[0,1]}|y - z|\big),\ \forall x, y, z \in \mathrm{X}.$$

Then (X, S_T) is a symmetric complete *TCS-MS* via $\mathcal{F}_1(t) = t$, $\mathcal{F}_2(t) = 2t\sqrt{1+t^2}$ and $\mathcal{F}_3(t) = sinh(4t)$, $\forall t \ge 0$.

We use the Banach-type fixed point result in *TCS-MS* to obtain the following theorem that under certain assumptions the existence of a solution of (2) is guaranteed.

Theorem 2. Suppose that

$$\sinh(2|\mathcal{M}(t,s,x(s)) - \mathcal{M}(t,s,y(s))|) \leq k \cdot \sinh(2|x(s) - y(s)|), \qquad (3)$$

for all $x, y \in X$ and $t, s \in [0,1]$, where $k \in [0,1)$. Then, the equation (2) has a unique solution in X.

In fact, if we define the integral operator $T: \mathrm{X} \to \mathrm{X}$ as $Tx(t) = \int_0^1 \mathcal{M}(t,s,x(s))ds$ for all $t, s \in [0,1]$, we can conclude that this operator satisfies the condition of Theorem 1 under the assumption (3). Thus T has a unique fixed point, which means that the integral equation (2) has a unique solution in X. Similar to Theorem 2, we can find applications to various types of operator equations that arise in practice.

1. Bakhtin A. The Contractive Mapping Principle in Almost Metric Spaces//Funct. Anal. Gos. Ped. Inst. Unianowsk. 1989. V. 30. P. 26–37.
2. Kamran T., Samreen M., UL Ain Q. A Generalization of *b*-Metric Space and Some Fixed Point Theorems//Mathematics. 2017. V. 5. p. 19.
3. Mlaiki N., Aydi H., Souayah N., Abdeljawad T. Controlled Metric Type Spaces and the Related Contraction Principle//Mathematics. 2018. V. 6. p.194.
4. Tasneem Z. S., Gopalan K., Abdeljawad T. A different approach to fixed point theorems on triple controlled metric type spaces with a numerical experiment//Dynamic Systems and Applications. 2021. V. 30, № 1. P. 111–130.
5. Parvaneh V. Fixed points of $(\psi, \phi)_\Omega$ -contractive mappings in ordered p-metric spaces// Global Analysis and Discrete Mathematics. 2020. V. 4, № 1. P. 15–29.
6. Kil C. J., Ho K., Yang W., Kim U. O. Triple-Composed Metric Spaces and Related Fixed Point Results With Application//Journal of Function Spaces. 2024. V. 2024, Article ID 6466538, 9 pages.
7. Sedghi S., Shobe N., Aliouche A. A Generalization of Fixed Point Theorems in S-Metric Spaces//Mat. Vesnik. 2012. V. 64. P. 258–266.
8. Souayah N., Mlaiki N. A Fixed Point Theorem in S_b-Metric Spaces//J. Math. Comp. Sci. 2016. V. 16. P. 131–139.
9. Rohen Y., Dosenovic T., Radenovic S. A Note on the Paper "A Fixed Point Theorem in Sb-Metric Spaces"//Filomat. 2017. V. 31, № 11. P. 3335–3346.
10. Mlaiki N. Extended S_b-Metric Spaces//J. Math. Anal. 2018. V. 9. P. 124–135.
11. Mustafa Z., Shahkoohi R. J., Parvaneh V., Kadelburg Z., Jaradat M. M. M. Ordered S_p-metric spaces and some fixed point theorems for contractive mappings with application to periodic boundary value problems//Fixed Point Theory and Applications. 2019. V. 2019, № 1. p.16.
12. Ekiz Yazici N., Ege O., Mlaiki N., Mukheimer A. Controlled S-Metric-Type Spaces and Applications to Fractional Integrals//Symmetry. 2023. V. 15. p. 1100.
13. Gangwar A., Rawat S., Dimri R. C. Solution of differential inclusion problem in controlled S-metric spaces via new multivalued fixed point theorem//The Journal of Analysis. 2023. V. 31. P. 2459–2472.
14. Azmi F.M. Wardowski Contraction on Controlled S-Metric Type Spaces with Fixed Point Results//Int. J. Anal. Appl. 2024. V. 22. p. 151.
15. Kil C. J., Choe C., Rim U. Fixed Point Results for Nonlinear F-Contractions in Composed S-Metric Spaces//Journal of Function Spaces. 2025. V. 2025. Article ID 1933779, 12 pages.

DATA-DRIVEN QUALITY PREDICTION OF BATCH PROCESS USING MULTI-OUTPUT LEAST SQUARE SUPPORT VECTOR REGRESSION WITH MIXED KERNEL

Chung Il Hyon, Chong Wi Hyon
Kim Chaek University of Technology, Kim Chaek University of Technology,
Pyongyang, DPR Korea
hci83109@star-co.net.kp

Quality prediction in chemical or metallurgical batch processes has become a benchmark problem for prediction algorithms, because of its inherent complexity. In recent years, random forest prediction model, extreme learning machine, partial least square model, support vector machine, fuzzy logic model and Wiener model have been used for nonlinear system prediction and identification. Their combination has also exhibited their great potential. In some chemical batch processes, the direct online-measurement is difficult to be realized using the existing conventional sensors and the offline assaying process often takes long time interval. Usually, they use entire batch-to-batch information to predict quality and but few researches have used the features of the information during the tapping interval for batch operation process. This paper proposes a data-driven mixed kernel SVR modelling optimized by multi-objective stochastic fractal search (MOSFS) algorithm for the batch process in which the measurement of variables is impossible or very difficult.

The LSSVR reduces the computational complexity by changing the inequality constraints of ε-SVR into equality constraints and using the sum of square error (SSE) cost function instead of ε-insensitive loss. According to the feature-based TL theory, the regressive functions include the personal feature vector of original space and the other part is the public vector of shared latent subspace as follows.

$$f_i(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\omega}_i^T \mathbf{x}_i + \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\Omega} \mathbf{x}_i, i = 1,2$$

To solve the personal feature matrix $\mathbf{M}$, the public feature vector $\boldsymbol{\omega}_0 \in R^n$, and the bias vector $\mathbf{b}$ simultaneously, one can minimize the following structural risk function with restrictions:

$$\min_{\boldsymbol{\omega}_0 \in R^n, \mathbf{M} \in R^{n \times m}} J(\boldsymbol{\omega}_0, \mathbf{M}) = \frac{1}{2}\left[{\boldsymbol{\omega}_0}^T \boldsymbol{\omega}_0 + \frac{\gamma}{m} \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} \left\| \mu_{i,j} \right\|^2 \right] + C \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} {\varepsilon_{i,j}}^2$$

$$s.t. \, y_i = \varphi(\mathbf{x}_i)^T (\boldsymbol{\omega}_0 \otimes [1,1,...,1]_{1 \times m} + \mathbf{M}) + b_i \otimes [1,1,...,1]_{1 \times m} + \boldsymbol{\varepsilon}_i$$

The kernel functions are summarized into two categories: partial kernel function and global kernel function. These two kernel functions can be combined to improve the ability of LSSVR.

$$K_{hybrid} = \alpha K_{rbf} + (1-\alpha) K_{poly}, \alpha \in [0,1]$$

$$K_{poly}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = [(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) + 1]^q$$

$$K_{rbf}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp\left(- \frac{\left\| \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i \right\|^2}{2\sigma^2} \right)$$

For selecting input variables, the main time-domain statistical features are selected as candidate variables for each variable including mean, RMS, kurtosis and skewness. Kurtosis reflects signal distribution, or equivalently, how outlier-prone the signal is. The more outliers, the greater the kurtosis. Its definition is as follows:

$$x_{kurt} = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2\right]^2}$$

Skewness is a measure of the asymmetry of the data around the sample mean. Skewness is defined as follows:

$$x_{skew} = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2\right]^{3/2}}$$

For selecting variables, correlation is introduced to determine the influence degree that input variables have on the model output.

The correlation coefficient is defined as follows:

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^{n}(x_{ij} - \overline{x_i})(y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(x_{ij} - \overline{x_i})^2}\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(y_j - \bar{y})^2}}$$

where R_i is the correlation coefficient of ith input variable, $\overline{x_i}$, $\bar{y}$ represent the mean values of input and output variables, respectively.

As different input variables have different dimensions of magnitude, input variables should be normalized to the range 0-1 by the following equation.

$$\overline{x_i(k)} = \frac{x_i(k) - \min(x_i(k))}{\max(x_i(k)) - \min(x_i(k))}$$

In order to determine the optimal parameters of mixed-kernel LSSVR prediction model, the multi-objective stochastic fractal search (MOSFS) algorithm is used.

Data experiment is done by artificial data from well-known multimodal benchmark functions and the industrial data from the blast furnace with the proposed method.

The simulation parameters optimized by MOSFS are given in Table 1 and its prediction results are shown in Fig 1.

Table 1 – Simulation parameters

Prediction methods	Simulation parameters
Mixed kernel LSSVR	$C = 23.4, \gamma = 1.6, \sigma = 0.24, \alpha = 0.93$
RBF kernel LSSVR	$C = 18.4, \gamma = 9.9, \sigma = 4.9$

Table 2 – Prediction results

Prediction methods	Root mean square error value	Mean absolute error value	Max absolute error value
Mixed kernel-y1	0.1915	0.1391	0.3087
RBF kernel-y1	0.3636	0.2546	1.6295
Mixed kernel-y2	0.1725	0.1054	0.4768
RBF kernel-y2	0.3161	0.3441	1.0626

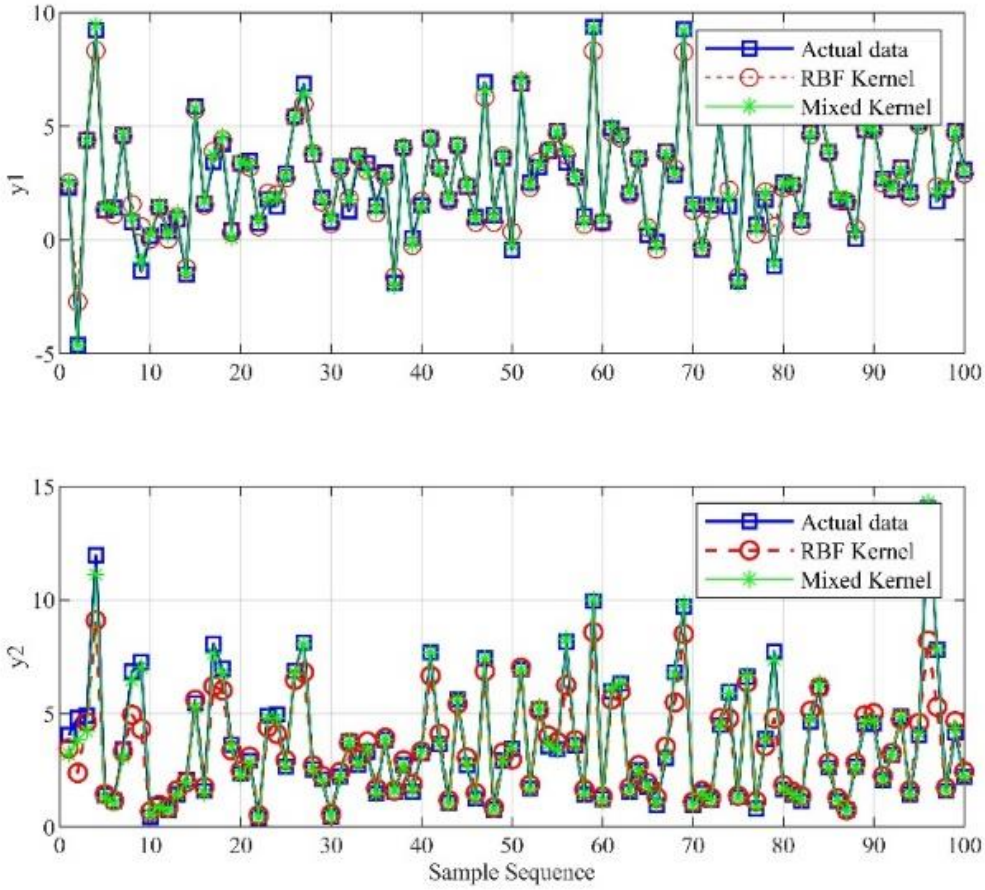


Fig. 1. Prediction result for artificial data

Table 2 shows that the mixed kernel LSSVR gives better prediction results for all outputs because of the combination of partial characteristic and global characteristic. Prediction result for sulfur and carbon content in ironmaking is shown in Table 3 and Fig 2.

Table 3 – Prediction results for real data

Output	Root mean square error value	Mean absolute error value	Max absolute error value
Carbon	0.0158	0.0113	0.0421
Sulfur	0.0026	0.0020	0.0079

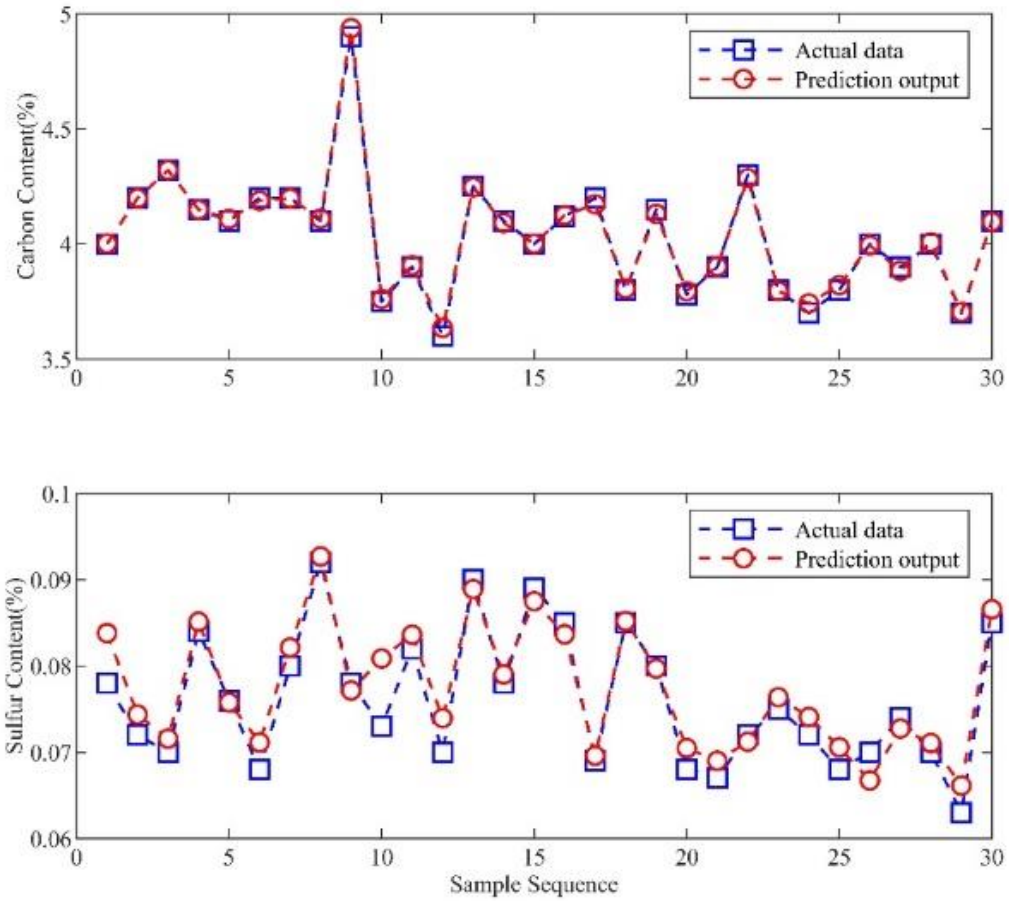


Fig. 2. Prediction result for real data

From Table 3, it can be found that the proposed prediction method has an obvious prediction accuracy for each content including sulfur and carbon.

For future research, the proposed prediction model can be used for prediction control of batch process.

1. Ping Zhou, Dongwei Guo, Data-driven predictive control of molten iron quality in blast furnace ironmaking using multi-output LS-SVR based inverse system identification, Neuro-computing (2018) 1–10.
2. Ping Zhou, Dongwei Guo, Data-Driven Robust M-LS-SVR-Based NARX Modelling for Estimation and Control of Molten Iron Quality Indices in Blast Furnace Ironmaking, IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS AND LEARNING SYSTEMS (2018), 1-15.
3. S. Khalilpourazari, B. Naderi, Multi-Objective Stochastic Fractal Search: a powerful algorithm for solving complex multi-objective optimization problems, Soft Computing (2019) 1-30.

ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROL OF AN UNMANNED SURFACE VEHICLE BASED ON NDOB

Chung-Il Kim*, Chong-Song Choe
Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kim Chaek University of Technology, Pyongyang, DPR Korea
kci90717@star-co.net.kp

An adaptive sliding mode control (SMC) approach is developed for the investigation of unmanned surface vehicle (USV) based on Nonlinear Disturbance of Observer (NDOB) in this paper. First, a mathematical model of USV motion is devised to consider added mass and wind variation when a drowning man clutches the USV. Then, a nonlinear disturbance observer is designed to estimate uncertain disturbances including mass variation. Finally, an adaptive sliding mode controller is designed to consider varying displacement and wind effect. The numerical simulation is carried out to verify the effectiveness for the proposed approach and compared to the precedent controller without considering varying mass and wind effect simultaneously. The results show that this methodology enables USV to guarantee the fast convergence rate and stability including a transient period of time to rescue a drowning man.

1. Introduction

In order to perform assigned missions under various uncertain disturbances, the study of meaningful analysis of USV motion and the effects of disturbance have increasingly grown [1, 2]. Some references are focused to describe the system performance when displacement are time varying. Liu et al. [3] devised a linear parameter varying control method to operate a USV under variation in its overall mass. Klinger et al. [4] evaluated the performance of two low level controllers of an unmanned surface vehicle with uncertain displacement and drag.

When a drowning man clutches the USV, a sudden change in the total mass including the USV may be occurred, and it may ultimately tilted with unknown changes in displacement. Thus, the development of an effective and robust controller is highly demanded to cope with the uncertain mass and wind variation during the transient periods of time.

2. Equation of motion

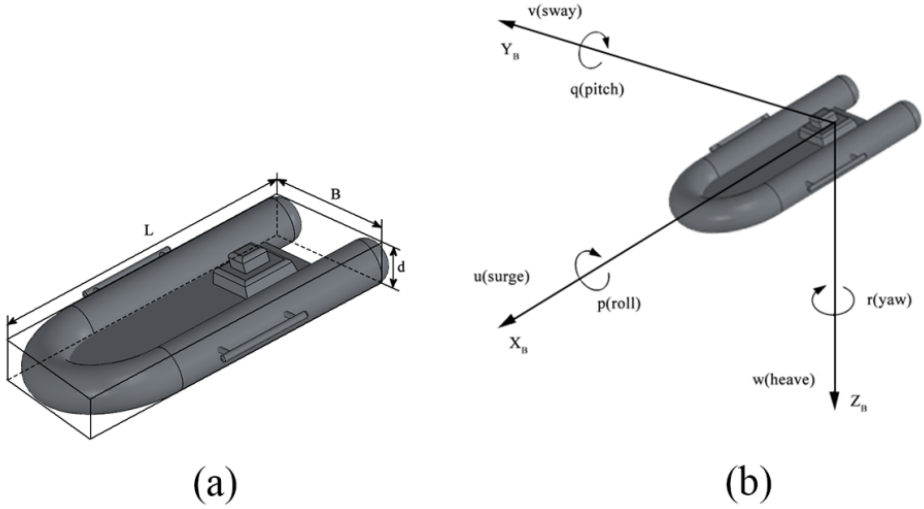


Fig. 1 The motion of USV. **a** Dimensions of USV. **b** 6 DOFs motion of USV.

If we consider wind disturbance, the equation of motion can be expressed as:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau + \tau_w + \varepsilon \qquad (1)$$

M is an inertia tensor.[4]. $C(v)$ is a Coriolis matrix. The hydrodynamic damping ma trix $D(v)$ is the summation of linear and nonlinear drag matrices. τ is a vector of the forces and moment generated by vehicle's thrusters; ε is a vector of the forces and moment gener ated by other disturbance; $v = [u \quad v \quad r]^T$ is a vector which includes surge speed, sway spee d, and yaw angular velocity; τ_W denotes the forces and moments caused by wind.

3. Controller Design

3.1 Design of Nonlinear Disturbance Observer

A nonlinear disturbance observer (NDOB) is adopted to estimate the disturbance in [5]. The following equation can be obtained from Eq. (1).

$$\dot{v} = M^{-1}\left(-Cv - Dv + \xi^T(U_R, \alpha_R)W\right) + M^{-1}\tau + M^{-1}\varepsilon \qquad (2)$$

A NDOB is used to estimate uncertainties and external disturbances of the system except wind disturbance and compensate accordingly.

$$\begin{cases} \dot{z} = -LM^{-1}z - L\left[M^{-1}Lv \right. \\ \qquad \left. + M^{-1}\left(-Cv - DV + \xi^T(U_R, \alpha_R)W + M^{-1}\tau\right)\right] \\ \hat{\varepsilon} = z + Lv \end{cases} \qquad (3)$$

where L is the disturbance observer gain matrix to be designed, z is the internal state vector of the nonlinear observer, and $\hat{\varepsilon}$ is the estimation vector of the disturbance vector ε .

3.2. Design an Adaptive Sliding mode Controller

The following equation is a sliding surface for Eq. (1) [6].

$$s = v_e + k\int_0^t v_e dt \qquad (4)$$

where k is positive parameter, and $v_e = v_d - v$ is the velocity tracking error.

Define the Lyapunov function as follows:

$$V = \frac{1}{2}s^T s + \frac{1}{2\eta}\tilde{W}^T\tilde{W} \qquad (5)$$

where $\tilde{W} = \hat{W} - W$ is the error between the estimated and the real value, and η is positive parameter.

Then $\dot{V}$ will become Eq. (6).

$$\begin{aligned} \dot{V} = s^T\big(&\dot{v}_d + M^{-1}(Cv + Dv) + kv_e \\ &- M^{-1}\xi^T(U_R, \alpha_R)\hat{W} - M^{-1}\varepsilon - M^{-1}\tau\big) \end{aligned} \qquad (6)$$

Thus, the derivative of the Lyapunov function is monotonically decreased by determining the thrust vector expression as follows:

$$\begin{aligned} \tau = M\big(&\dot{v}_d + M^{-1}(Cv + Dv) + kv_e \\ &- M^{-1}\xi^T(U_R, \alpha_R)\hat{W} - M^{-1}\varepsilon\big) \\ &+ \rho_1 \operatorname{sgn}(s) + \rho_2 s \end{aligned} \qquad (7),$$

where $\operatorname{sgn}(s)$ is the sign function for the sliding surface, ρ_1, and ρ_2 are positive constants.

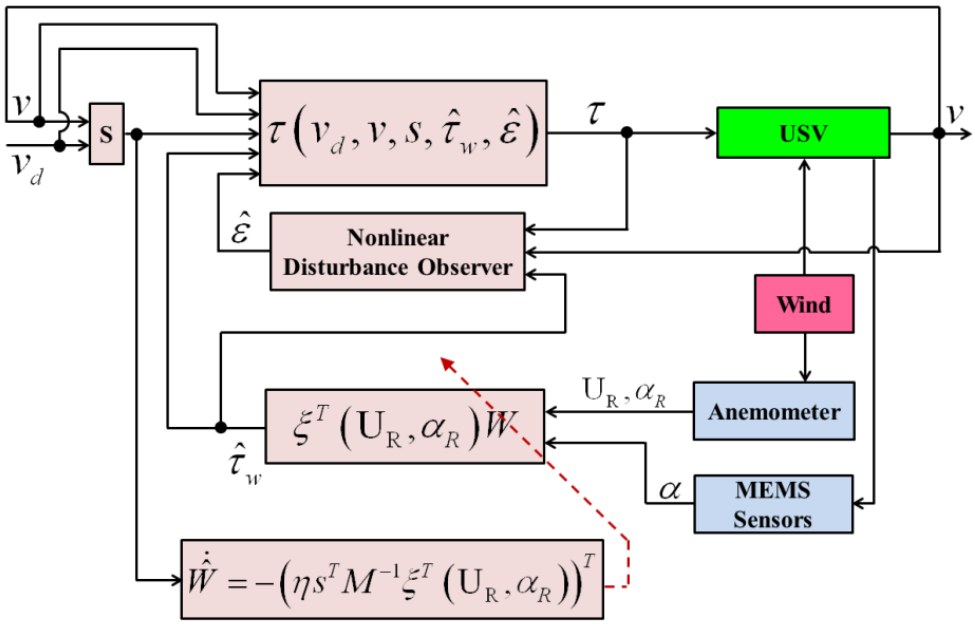


Fig. 2 Schematic diagram of the proposed control strategy.

4. Simulation and Results

The performance of the proposed controller is compared with the precedent controller (without considering wind effect simultaneously) in the case of relative wind speed $U_R = 0.5m/s$, wind angle of attack $\alpha_R = 20°$, and target speed $v_d = 0.5m/s$.

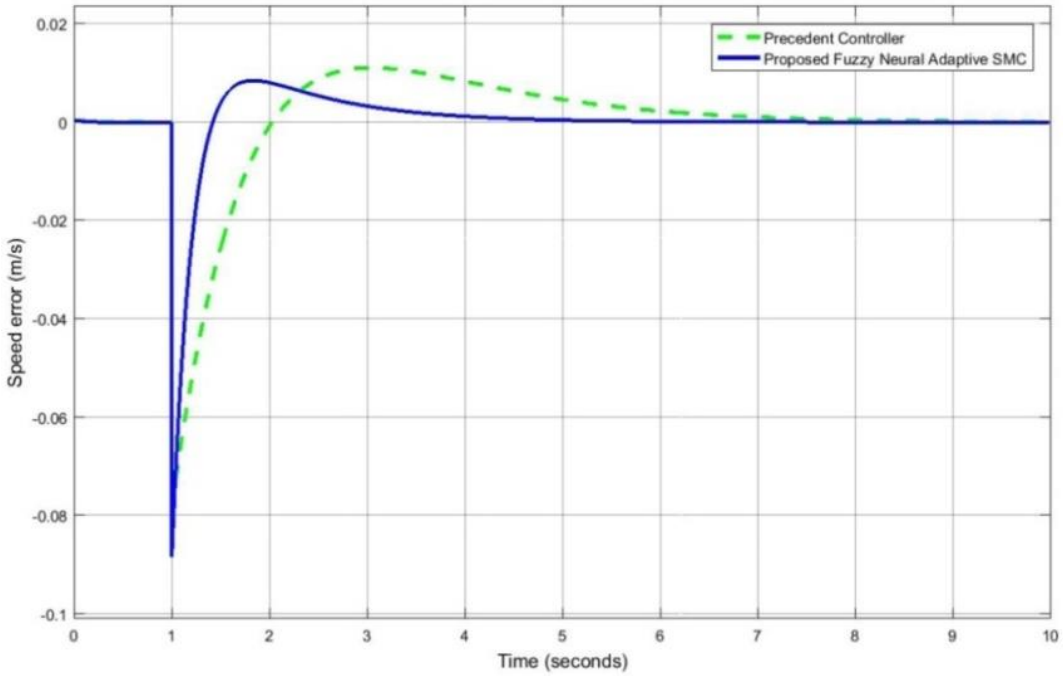


Fig. 3 Speed error in the case of added mass is $50kg$.

The proposed controller shows 4.22% better overshoot performance in the case of target speed $v_d = 0.1m/s$ and the average overshoot improvement is 8% in the case of target speed $v_d = 0.2m/s$ and $v_d = 0.3m/s$, respectively. And the steady-state error converges to zero within 1s.

5. Conclusion

We suggested a mathematical model of USV motion in the presence of mass variation, and then designed an adaptive sliding mode controller to estimate uncertain mass and wind disturbance simultaneously by using NDOB. The simulation shows that this method can be a good selection for safe operation of the USV even during transients with varying mass and wind effect simultaneously using the nonlinear disturbance observer.

1. M. Caccia, M. Bibuli, R. Bono, G. Bruzzone, Basic navigation, guidance and control of an unmanned surface vehicle. Auton Robots. 25, 349–365 (2008).
2. C.R. Sonnenburg, C.A. Woolsey, Modeling, identification, and control of an unmanned surface vehicle. Journal of Field Robotics. 30(3), 371–398 (2013).
3. Z.X. Liu, C. Yuan, Y.M. Zhang, Linear parameter varying adaptive control of an unmanned surface vehicle. IFAC-PapersOnLine. 48(16), 140-145 (2015).
4. W.B. Klinger, I.R. Bertaska, K.D. von Ellenrieder, Control of an unmanned surface vehicle with uncertain displacement and drag. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 42(2), 458-476 (2017).
5. L. Hou, L. Wang, H. Wang, SMC for systems with matched and mismatched uncertainties and disturbances based on NDOB. Acta Automatica Sinica. 43(7), 1257-1264 (2017).
6. L. Qiao, W. Zhang, Double-loop chattering-free adaptive integral sliding mode control for underwater vehicles. IEEE. 1–6 (2016).

2D REGULARIZED SPLINE

Ingtem J.G.
Lomonosov Moscow State UNiversity, Moscow, Russia;
MSU-BIT, Shenzhen, China
j-g.ingtem@cs.msu.ru

The interpolation of functions that change smoothly without a rapid growth in the derivative usually does not cause much difficulty. However, interpolation by standard methods of functions in which there is a rapid increase in the derivative or functions with several local minima often leads to the accumulation of errors and the effect of false oscillations.

A spline interpolation method of two dimensional data given on a rectangular uniform grid is considered. A two-dimensional interpolation spline is constructed in such a way that for each variable, a one-dimensional regularized spline of class C^1 is constructed.

The one-dimensional regularized spline is stable because all its coefficients (which are the values of the first derivative of the spline at the construction nodes - the Hermite spline) are found from the condition that the minimum of the derivative in L_2 norm is reached.

The developed method of interpolation of two-dimensional data with a bicubic spline has the property of a minimum derivative norm for each variable on the grid of values. the interpolation area is a rectangle with a uniform grid on each variable. The spline is built on a grid of values as an Hermite spline on one variable, the coefficients of which are Hermitian splines on the 2nd variable. These coefficients are found from the condition of minimizing the norm of the first derivative for each variable (regularized splines [1])

$$S(x,y) = S_{ij}(x,y) = f_i^j(y)Q_i(x) + f_{i+1}^j(y)R_i(x) + p_i^j(y)\psi_i(x) + p_{i+1}^j(y)\phi_i(x);\ \forall\, x \in [a,b]$$

Where $S_{ij}(x_i,y) = f_i^j(y) = f_{ij}Q_j(y) + f_{i\,j+1}R_j(y) + m_{ij}\psi_j(y) + m_{i\,j+1}\phi_j(y)$,

$$\left(S_{ij}\right)_x'(x_i,y) = p_i^j(y) = p_{ij}Q_j(y) + p_{i\,j+1}R_j(y) + \mu_{ij}\psi_j(y) + \mu_{i\,j+1}\phi_j(y),$$

$$S_{ij}(x_i,y_j) = f_{ij},\ \ \left(S_{ij}\right)_x'(x_i,y_j) = p_{ij}\ ,\ \ \left(S_{ij}\right)_y'(x_i,y_j) = m_{ij}\ ,\ \ \left(S_{ij}\right)_{xy}''(x_i,y_j) = \mu_{ij}\ .$$

$$\min_{\bar{p}_j=\left(p_0^j,\dots,p_M^j\right)} \left\|S_x'(x,y_j)\right\|_{L_{2[a;b]}}^2, \qquad j = 0,1,\dots,N\ ,$$

$$\min_{\bar{m}_i=\left(m_i^0,\dots,m_i^M\right)} \|f_i'(y)\|_{L_{2[c;d]}}^2, \qquad \min_{\bar{\mu}_i=\left(\mu_i^0,\dots,\mu_i^M\right)} \|p_i'(y)\|_{L_2[c;d]}^2, \qquad i = 0,1,\dots,M.$$

This construction of the 2D-spline function allows us to consecutively find all coefficients.

1. Dmitriev V.I., Ingtem J.G. The Regularized Spline (R-Spline) Method for Function Approximation //Computational Mathematics and Modeling. 2019. Vol. 30, No.3, pp.198-206.
2. Silaev D.A., Semilocal smoothihg S-splines // Computer Research and Modeling. 2010 Vol. 2, No. 4, pp. 349-357.
3. Bogdanov V., Volkov Yu. Interpolation by cubic tension splines with convexity inheritance //Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2025. Vol. 13, pp. 37-49.

RADAR SIGNAL DETECTION BY INFORMATION GEOMETRY METHOD IN SIGNAL SUBMANIFOLDS

Myong Sim Kwon, Il Sin Kim, Kang Il Mun
Faculty of Applied Mathematics, Kim Chaek University of Technology,
Pyongyang, DPR Korea
kms75226@star-co.net.kp

Several detectors have been proposed to perform radar target detection by small impulse data, with information geometry of a positive Hermitian matrix manifold. Recently, detectors have been proposed that find matrix geometric mean over a positive Hermitian matrix manifold and use it and the Riemann distance between the detection cell as a measure of similarity between noise and target. These detectors have the limitation that detection performance is reduced when noise signal levels are increased or false alarm rates are reduced. We construct a submanifold that can be considered to consist of noisy signals. Then, we propose a detector that projects the test cell to a submanifold and compares it with a projection point. As a result, we show that the detection performance is improved.

1. Introduction

The canonical constant false alarm rate (CFAR) detector [6] has the limitation that the detection performance decreases with decreasing number of pulse branches and increasing noise intensity. In [4], radar received signals are modeled as a Hermitian positive matrix manifold, the arithmetic mean of the reference signals used in CFAR is replaced by the Riemann mean [6], and the distance between the two signals is proposed by detectors using Riemann distance instead of Euclidean distance to improve the detection performance. The performance of radar signal detection depends on the use of the distance between two points in the signal model [1].

Improved detectors use the method of finding the Riemann mean in the received signals modeled as a positive Hermitian matrix manifold [2] and separating targets using either the Riemann distance between the detection cell or the various types of matrix divergence [5].

This method results in a false target detection when the detection cell is somewhat distant, even if the same noise is greater than the threshold, with a distance of the mean or median greater than the threshold. However, when all the same noises constitute a background submanifold that can be considered as an element of the background manifold, the projection distance is zero because the detection cell is its element when projected onto the submanifold in the case of noise, and in the case of the target, the projection distance is not zero because the point of the background submanifold is not. Thus, a good construction of the submanifold that consists of noisy signals can significantly improve the target detection performance.

We construct a signal submanifold consisting of noisy signals on a positive Hermitian matrix manifold and propose a new detection method for detecting targets by geodetic projection onto a signal submanifold using Bregman divergence by a matrix convex function.

We compare the proposed detection method with CFAR and TSL detectors to improve the detection performance.

The rest of this paper is organized as follows.

In Section 2, we construct the background submanifold that the noise signals constitute. In Section 3, we find the projection points from the target signal to the background manifold by Lagrangian optimization with equality constraints and construct

the detection algorithm. Section 4 presents the simulation experiments on the proposed detector and compares its performance with previous detectors. Section 5 concludes the study.

2. A new detector model and signal submanifold configuration

MCFAR detectors with matrix information geometry or TBD detectors with matrix divergence detect targets using covariance matrices from the clutter data without directly using radar signal data [4,5,6], However, since there is a significant difference between the noise signal and the target signal, we can construct a submanifold that reflects the noise signal out. Then if the detected signal is noisy, the projection distance to this submanifold will be zero, and if the target, the geodesic projection distance will not be zero. The detected signal is projected onto this submanifold and the Riemannian geometric distance between the projection point and the detected signal is used for detection. Our detection model is as follows (see Fig.1).

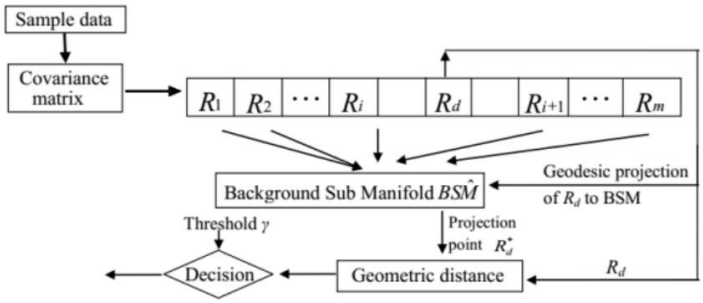


Fig. 1 A detector model (BSMP) mapping to a background submanifold

Let $Z=[z_1,z_2\cdots z_n]^T$ be a sequence of signal samples received from the radar. This sample data $Z=[z_1,z_2\cdots z_n]^T$ is assumed to follow a complex multivariate Gaussian distribution with zero mean. That is, $z\sim CN(0,R)$ and

$$p(z\mid R)=\frac{1}{\pi^n\det(R)}\exp\{-z^HR^{-1}z\} \tag{1}$$

Here, the matrix R is a positive Hermitian matrix as follows :

$$R=[zz^H]=\begin{bmatrix} r_0 & \bar{r}_1 & \cdots & \bar{r}_{n-1} \\ r_1 & r_0 & \cdots & \bar{r}_{n-2} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & \cdots & r_1 & r_0 \end{bmatrix},$$

$$r_k=[z_iz_{i+k}],0\le k\le n-1,0\le i\le n-1 \tag{2}$$

where $\bar{r}_i$ denotes the conjugation of r_i and r_k is the correlation coefficient of the sample data.

R obtained from the sample data is an element of a positive Hermitian matrix manifold [6]. This will allow radar target detection on the Riemannian manifold $PH(n)$. Finally, radar signal target detection will be discussed on the Riemann manifold.

Let $\{R_1,R_2,...,R_m\}\subset PH(n)$ be the set obtained from the radar received signals. Then, let us denote the reference cells around the detection cell by the Frobenius norm on contraction. Then, the points are grouped.

[Definition] A class of clusters that can be considered to be composed only of noisy signals is called background submanifold and denoted by $BSM = \{R_k\}_{k=1,...,m-l}$, where l is the number of signals to be excluded.

The clustering algorithm is as follows.

Step 1, Calculate the Frobenius norm of reference cells and store the set as $\{d_1,...,d_k\}$.

Step 2, Align the stored set $\{d_1,...,d_k\}$. Then $i = k/2$

Step 3, Suppose that more than half of the reference cells are elements of the background submanifold and calculate the mean and variance.

$$\gamma_{\max} = d_i,\ \bar{d} = mean\{d_i,...,d_k\},\ \sigma^2 = \frac{1}{k-i}\sum_{l=i}^{k}(d_l - \bar{d})^2$$

Step 4, $d_{k+1} < \bar{d} + 3\sigma$, $i = i+1$ returns to Step 3.

3. Radar Signal Detection by Geodesic Projection

When $f(X), X \in PH(n)$ is a differentiable convex function defined on a positive Hermitian matrix manifold, its gradient $X^* = \nabla f(X)$ is equal to the normal vector normal to the tangent space at the point X of a positive Hermitian matrix manifold.

Since different points of a positive Hermitian matrix manifold correspond to different normal vectors, this normal vector gives another coordinate system to a positive Hermitian matrix manifold. This coordinate system is called a dual coordinate system. Two coordinate systems X and X^* have the Legendre transformation relation [3].

Defining

$$f^*(X^*) = X \cdot X^* - f(X) \tag{3}$$

as a dual convex function in the dual coordinates X^*, we have

$$\nabla f^*(X^*) = X + \frac{\partial X}{\partial X^*}X^* - \nabla f(X)\frac{\partial X}{\partial X^*} \tag{4}$$

Let $f(X) = tr(X^2)$ be a matrix convex function, and then $tr(f(\boldsymbol{X})) = tr(\boldsymbol{X}^2)$, $f'(\boldsymbol{Y}) = 2\boldsymbol{Y}$ is established. So the Bregman Matrix divergence and the dual Bregman Matrix divergence [4] denoted as following:

$$D(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y}) = tr(\boldsymbol{X}^2 - \boldsymbol{Y}^2 - 2\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{Y})) \tag{5}$$

$$D^*(\boldsymbol{X}^*,\boldsymbol{Y}^*) = tr(\boldsymbol{Y}^2 - \boldsymbol{X}^2 - 2\boldsymbol{X}(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X})) \tag{6}$$

On the other hand, it can be seen from [2,3] that for a matrix Bregman divergence $D(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y})$ and a dual divergence $D^*(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y})$ by a matrix convex function $f(X)$, $D(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y}) = D^*(Y,X)$ holds. We also know that the divergence is similar to the square of the distance and that the generalized Pythagorean theorem and projection theorem on positive Hermitian matrix manifolds hold.[1,2] In particular, if the matrix convex function is $f(X) = tr(X^2)$, then $g_{ij} = \delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases}$ is, and the Bregman divergence and the dual Bregman divergence due to this convex function are the same, and hence the self-dual flat manifold structure is introduced [3].

In the sense of divergence, the problem of finding the point of a submanifold BSM closest to a point R of a manifold has many applications. Hence we find the geodesic projection from point $R \in PH(n)$ to the background submanifold $BSM = \{R_k\}_{k=1,...,m-l}$.

Let $R \in HPD$ be a test cell and $BSM = \{R_k\}_{k=1,...,m-l}$ a background submanifold constructed in Step 2.

[Theorem] The geodesic projection point $\hat{R}_M \in BSM \subset PH(n)$ into the background submanifold BSM of the test cell $R_D \in PH(n)$ is

$$\hat{R}_M = \frac{R_D}{1+\lambda\sqrt{1+\| 2R_D \|_F^2}} \tag{7}$$

, where $\lambda = \frac{\frac{\| R_D \|_F}{\gamma_{\max}} - 1}{\sqrt{1+\| 2R_D \|_F^2}}, \lambda > 0$.

Using this projection point and the geometric distance from the test cell, a new detector is designed.

4. Simulation

For the performance analysis of the proposed detector, numerical simulations are carried out by Matlab Phased Array System Toolbox.

In a single radar system, we transmit the pulse-band frequency 3000 kHz, pulse repetition frequency 30 kHz, peak power 3300 W, defuzzification distance 5000 m, rectangular pulse radar received signals, and simulate the received signal in a 6 dB noise-scattered radio environment for three targets with a range of 250,09 m, 2609 m, 4109 m and a reflection area of 0.8, 1, and 1.5, respectively. The distance to the maximum target in the receiving direction is then represented by 200 signals and seven pulse branches are used to calculate the pulse integral and the 7 × 7 correlation matrix.

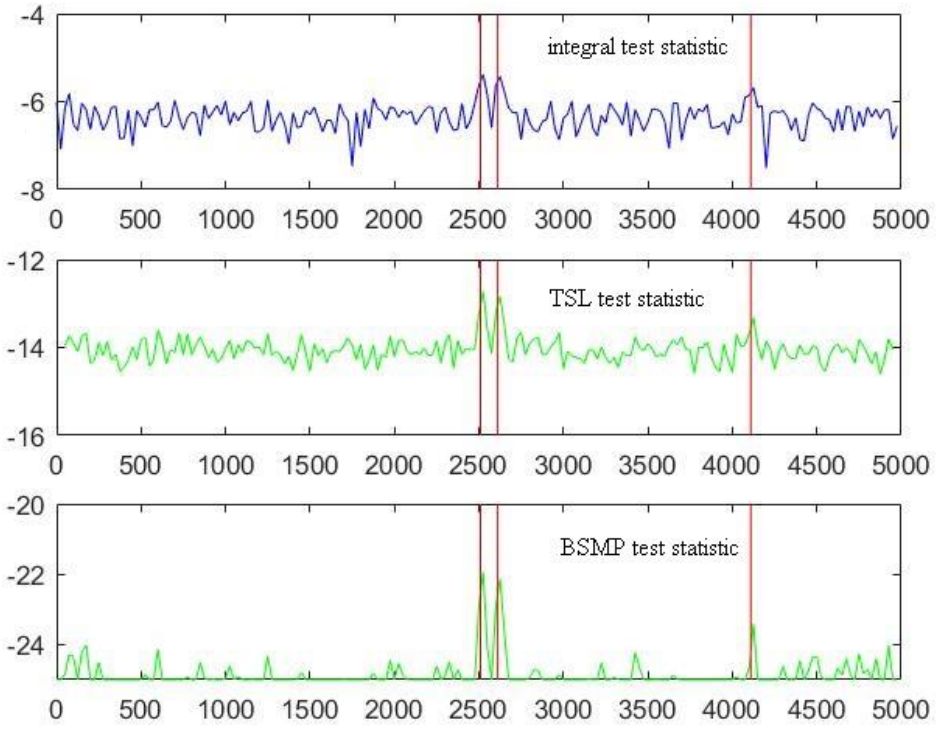


Fig. 2 Comparison of test statistics

In the figure, the first is the result of pulse integration using seven pulse branches, the second is the calculation of the median of reference cells and the total Bragg divergence with the detection cell using the 7*7 correlation matrix (see [4]), and the third is the

calculation of the divergence from the detection cell to the background submanifold by the proposed method.

The calculated values are expressed as the logarithmic values of the conventional values. As can be seen from the calculation results, the impulse integration results are difficult to distinguish between the detected signal and the background, and the method by which the total Bragman divergence is used can easily distinguish the target signal from the background signal and the impulse integral, but it is difficult to detect the signal for the third target. However, it can be seen that the proposed method clearly separates the third target, and the proposed detection idea can achieve high detection performance in the future.

5. Conclusions

In this paper, we propose the idea that geodetic mapping of the detection signal into this submanifold can improve the detection performance by constructing a background submanifold composed of noisy signals. Although there are several problems in constructing the background submanifold, we have found that a good construction to reflect the noise signal out will significantly improve the detection performance.

1. Amari. S and Cichocki. A. Information geometry of divergence functions // Bulletin of the polish academy of science technical sciences.2010. Vol. 58, No. 1, pp. 1-13.
2. Amari. S, Information Geometry and Its Applications, Applied Mathematical Sciences, Springer, 2016, 1-376.
3. Amari. S, Information Geometry and Its Applications: Convex Function and Dually Flat Manifold, F. Nielsen (Ed.): ETVC 2008, LNCS 5416, pp. 75–102, 2009.
4. Cheng. Y, Hua. X, Wang. H, Qin. Y, Li. X, The geometry of signal detection with applications to radar signal processing, Entropy 18 (2016) 381.
5. Hua. X, Cheng. Y, Wang. H, Qin. Y, Chen. D, Geometric target detection based on total Bregman divergence, Digital Signal Processing 75 (2018) 232–241.
6. Cheng. Y, Hua. X, Wang. H, Qin. Y, Li. X, Zhang. W, Matrix CFAR detectors based on symmetrized Kullback–Leibler and total Kullback–Leibler divergences, Digital Signal Processing 69 (2017) 106–116.

IMPORTANCE SAMPLING BASED ON SUBSET SIMULATION AND SCALING OF PDF

Sang Rim Kim, Hyon I Paek
Faculty of Applied Mathematics, Kim Chaek University of Technology,
Pyongyang, DPR Korea
ksr7623@star-co.net.kp

Research on the importance sampling (IS) based on Monte Carlo simulation (MCS) is widely conducted due to its good effectiveness in multi-dimensional simulation for estimating small failure probabilities. The adaptive importance sampling is a well-known Monte Carlo method that uses a reweighting strategy to iteratively estimate the IS density. The efficiency of the IS depends on the choice of the IS density. We combine a subset simulation, one of the IS density estimation methods, with a scaling of PDF. We implement a one-parameter control by integrating the parameter of the subset simulation and the scaling parameter of PDF. We show the effectiveness of the proposed method in probability estimation using various limit state functions.

1. Introduction

In reliability analysis, the interest is to assess the performance of system through evaluating its failure probability. Let X be an $n-$dimensional continuous random vector that models the system variables that are expected to exhibit uncertain behavior. The failure event can be defined as the collection of the outcomes of X for which the LSF $g(\boldsymbol{x})$ takes non-positive values. Hence, the failure event of the system can be denoted as follows:

$$F = \{\boldsymbol{x} \in R^n : g(\boldsymbol{x}) \leq 0\} \tag{1}$$

Then the failure probability is defined through the following integral:

$$P_F = \int_{R^n} I(\boldsymbol{x}) f(\boldsymbol{x}) d\boldsymbol{x}, \tag{2}$$

where $f(\boldsymbol{x})$ is the probability density function (PDF) of X and $I(\boldsymbol{x})$ is an indicator function defined as

$$I(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} 1, & g(\boldsymbol{x}) \leq 0 \\ 0, & otherwise \end{cases}. \tag{3}$$

The function $g(\boldsymbol{x})$ depends on the outcome of the process model, and hence the failure probability cannot be estimated analytically. Therefore, it needs to be approximated by means of an efficient method that minimizes the number of model evaluations [1]. For this sake, several methods have been developed, including approximation methods such as the intermediate failure event-based adaptive simulation method [2] and the first/second order reliability method (FORM/SORM) [3], and sample generation-based methods such as Markov Chain Monte Carlo (MCMC) [4] to generate samples approximately from any distribution. There are also adaptable variants of the method such as adaptive IS for computing multidimensional integrals [5], line sampling [6], and sampling method for probing the failure region [7].

The IS is an effective method to estimate the small failure probability with fewer samples by introducing a new IS PDF. Assuming the IS PDF $h(\boldsymbol{x})$, Eq. (2) can be rewritten as follows.

$$P_F = \int_{R^n} \frac{I(\boldsymbol{x}) f(\boldsymbol{x})}{h(\boldsymbol{x})} h(\boldsymbol{x}) d\boldsymbol{x} \tag{4}$$

Under the condition that the support of $h(\boldsymbol{x})$ contains the failure region, this modification does not change the value of the integral. In other words, in choosing the IS PDF $h(\boldsymbol{x})$, if $h(\boldsymbol{x}) = 0$, then $I(\boldsymbol{x}) f(\boldsymbol{x}) = 0$. Then, the IS estimate of P_F is given by MCS as follows:

$$\hat{P}_F = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I(\boldsymbol{x}_i)\frac{f(\boldsymbol{x}_i)}{h(\boldsymbol{x}_i)} \quad (5)$$

where the samples $\{\boldsymbol{x}_i, i = 1, \dots, n\}$ are distributed according to $h(\boldsymbol{x})$. Since $E_{h(\boldsymbol{x})}(\hat{P}_F) = P_F$, this estimator is an unbiased estimator. The effectiveness of the IS depends on the choice of this IS PDF $h(\boldsymbol{x})$. The optimal IS PDF can be found in the application of the cross-entropy (CE) method [8]. Gaussian mixture (GM) distribution has been proposed to deal with multimodal failure regions [6], and an effective IS has been proposed to facilitate the widespread application of stochastic process-based methods in complex problems [9]. In [10], an update scheme is proposed to estimate the parameters of GM model through modified expectation maximization (EM) algorithm in CE method, and a sequential importance sampling (SIS) [11] using Gaussian mixture is discussed and its performance is compared with CE method.

The quantity that indicates how close the failure probability estimator $\hat{P}_F$ is to the actual failure probability P_F is the relative bias (RB), which is given by

$$\mathrm{RB}(\hat{P}_F) = \frac{E(\hat{P}_F) - P_F}{P_F}.$$

In practice, the target failure probability is generally unknown and so the term $\mathrm{RB}(\hat{P}_F)$ is not computable. Hence, the accuracy of the estimator is estimated by the following relative standard error (RE) [12].

$$\mathrm{RE}(\hat{P}_F) = \frac{\sqrt{\mathrm{var}(\hat{P}_F)}}{E(\hat{P}_F)}$$

As a strategy to reduce the variance of the probability estimator, there are efficient sampling method that repeatedly apply to the IS PDF according to individual problems [13], hybrid process techniques combining IS and adaptive metamodeling techniques [14], adaptive variant algorithms which enhance the performance of subset simulation without additional model evaluation [15], and bridge IS [16]. In [17], the authors improved the convergence rate for the IS PDF estimation by reducing the variance of the IS estimator, while in [18] they addressed the stochastic optimization problem to increase the probability gradient descent rate while reducing the variance of the estimator. Also, in [19], a method of adjusting the ratio of PDFs participating in the mixture, using the mixture PDF was proposed to reduce the variance of the IS estimator, and in [20], an iterative optimization scheme was adopted to reach the minimum asymptotic variance, using the mixture PDF for variance reduction.

We propose a method to realize one-parameter control by integrating the parameter in subset simulation and the scaling parameter of PDF as a strategy to allow more samples to fall into the failure region during sampling.

The effectiveness of the proposed method will be verified by numerical experiments with some typical LSFs.

2. Subset Simulation and Scaling of PDF

In order to estimate the failure probability efficiently and reliably by means of IS, the IS PDF should be carefully chosen. There exists a theoretical optimal IS PDF, which has the following form [10].

$$h_{opt}(\boldsymbol{x}) = \frac{I(\boldsymbol{x})f(\boldsymbol{x})}{\int_{R^n} I(\boldsymbol{x})f(\boldsymbol{x})d\boldsymbol{x}} = \frac{I(\boldsymbol{x})f(\boldsymbol{x})}{P_F} \quad (6)$$

Eq. (6) is a PDF at which its support is the actual failure region, and its normalization constant P_F is the target failure probability. The normalization constant P_F is the target failure probability we have to obtain, so the use of this PDF is practically impossible. Therefore, we have to obtain a PDF that approximates the optimal IS PDF.

In IS, if more samples fall into the failure region during sampling, a small failure probability of can be effectively estimated. This can be achieved by introducing parameters into the integrand and adjusting the parameters appropriately.

If we apply the parameter to the indicator function, we define $\eta_j(\boldsymbol{x};\ \lambda_j) \coloneqq I(\boldsymbol{x};\ \lambda_j)f(\boldsymbol{x}), j = 1, \dots, T$. Here $I(\boldsymbol{x};\ \lambda_j), j = 1, \dots, T$ is the indicator functions given by

$$I(\boldsymbol{x};\ \lambda_j) = \begin{cases} 1, & g(\boldsymbol{x}) \le \lambda_j \\ 0, & \text{그외} \end{cases}, \lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_T = 0.$$

Then we get the following sequence of failure events, which leads to the extension of the failure region.

$$F_j = \{\boldsymbol{x} \in R^n : g(\boldsymbol{x}) \le \lambda_j\}, j = 1, \dots, T$$

Obviously, $F_1 \supset F_2 \supset \cdots \supset F_T = F$, and according to Eq. (2), we have the following relation:

$$P_{F_1} > P_{F_2} > \cdots > P_{F_T} = P_F$$

We will use the notation$P_{F_j} = P_j, j = 1, \dots, T$ in the following. When specifying the parameter $\lambda_j, j = 1, \dots, T$, we adjust the value of λ_1 such that the probability P_1 according to $\eta_1(\boldsymbol{x};\ \lambda_1)$ is sufficiently large. Then the initial intermediate failure probability P_1 becomes as follows:

$$P_1 = \int_{\boldsymbol{x} \in R^n} \eta_1(\boldsymbol{x};\ \lambda_1) d\boldsymbol{x} \tag{7}$$

When P_1 is estimated, the optimal IS PDF for the extended failure event has a similar form to Eq. (6).

$$h_1^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_1) = \frac{\eta_1(\boldsymbol{x};\ \lambda_1)}{P_1} \tag{8}$$

Using $h_1^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_1)$, we can estimate the probability of the next-stage intermediate failure event specified by $\eta_2(\boldsymbol{x};\ \lambda_2)$.

$$\begin{aligned} P_2 &= \int_{\boldsymbol{x} \in R^n} \frac{\eta_2(\boldsymbol{x};\ \lambda_2)}{h_1^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_1)} h_1^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_1) d\boldsymbol{x} \\ &= P_1 \int_{\boldsymbol{x} \in R^n} \frac{\eta_2(\boldsymbol{x};\ \lambda_2)}{\eta_1(\boldsymbol{x};\ \lambda_1)} h_1^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_1) d\boldsymbol{x} \end{aligned} \tag{9}$$

If P_2 is estimated, we can construct the optimal IS PDF corresponding to $\eta_2(\boldsymbol{x};\ \lambda_2)$.

$$h_2^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_2) = \frac{\eta_2(\boldsymbol{x};\ \lambda_2)}{P_2} \tag{10}$$

Using $h_2^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_2)$, we can estimate the probability associated with $\eta_3(\boldsymbol{x};\ \lambda_3)$ continuously and repeat this process until we reach the target failure event specified by $\eta_T(\boldsymbol{x};\ \lambda_T)$. Then, the failure probability is expressed as follows:

$$\begin{aligned} P_F &= P_{T-1} \int_{\boldsymbol{x} \in R^n} \frac{\eta_T(\boldsymbol{x};\ \lambda_T)}{\eta_{T-1}(\boldsymbol{x};\ \lambda_{T-1})} h_{T-1}^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_{T-1}) d\boldsymbol{x} \\ &= P_1 \prod_{j=1}^{T-1} \int_{\boldsymbol{x} \in R^n} \frac{\eta_{j+1}(\boldsymbol{x};\ \lambda_{j+1})}{\eta_j(\boldsymbol{x};\ \lambda_j)} h_j^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_j) d\boldsymbol{x} \end{aligned} \tag{11}$$

Substituting $\eta_j(\boldsymbol{x};\ \lambda_j) \coloneqq I(\boldsymbol{x};\ \lambda_j)f(\boldsymbol{x}),\ j = 1, \dots, T$ into Eq. (10), the failure probability can be written as follows:

$$P_F = P_1 \prod_{j=1}^{T-1} \int_{\boldsymbol{x} \in R^n} \frac{I(\boldsymbol{x};\ \lambda_{j+1})}{I(\boldsymbol{x};\ \lambda_j)} h_j^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_j) d\boldsymbol{x} \tag{12}$$

If we apply the parameter to the PDF, we define $\eta_j(\boldsymbol{x};\ \lambda_j) \coloneqq I(\boldsymbol{x}) f(\boldsymbol{x};\ \boldsymbol{I}\lambda_j^2)$, $j = 1, \dots, T$, where $\lambda_j, j = 1, \dots, T$ are the scaling parameters of the PDF at each stage, $\boldsymbol{I}$ is the identity matrix, $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_T = 1$, and $f(\boldsymbol{x};\ \boldsymbol{I}\lambda_j^2)$ is the *n*-dimensional zero-mean Gaussian PDF with covariance matrix $\boldsymbol{I}\lambda_j^2$. When specifying the parameter $\lambda_j, j = 1, \dots, T$, we adjust the value of λ_1 such that the probability P_1 according to $\eta_1(\boldsymbol{x};\ \lambda_1)$ is sufficiently

large. In the same manner as above, the optimal IS PDFs for failure events in the jth stage can be expressed as follows:

$$h_j^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_j) = \frac{\eta_j(\boldsymbol{x};\ \lambda_j)}{P_j} = \frac{I(\boldsymbol{x}) f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{I}\lambda_j^2)}{\int_{\boldsymbol{x}\in R^n} I(\boldsymbol{x}) f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{I}\lambda_j^2) d\boldsymbol{x}}, \quad j = 1, 2, \dots, T-1 \tag{13}$$

In the final stage, the final failure probability can be estimated by the following equation:

$$P_F = P_1 \prod_{j=1}^{T-1} \int_{\boldsymbol{x}\in R^n} \frac{f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{I}\lambda_{j+1}^2)}{f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{I}\lambda_j^2)} h_j^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_j) d\boldsymbol{x} \tag{14}$$

3. Subset Simulation and Scaling of PDF by one parameter

Since the final parameter in the IS based on the scaling of PDF is $\lambda_T = 1$, $\lambda_T - 1 = 0$ is the final parameter in the IS based on subset simulation, and the failure region and PDF can be simultaneously changed by one parameter.

For $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_T = 1$, we define $\eta_j(\boldsymbol{x};\ \lambda_j) \coloneqq I(\boldsymbol{x};\ \lambda_j - 1) f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{I}\lambda_j^2)$, $j = 1, \dots, T$. Then the initial intermediate failure probability P_1 changed by the parameter λ_1 becomes as follows:

$$P_1 = \int_{\boldsymbol{x}\in R^n} \eta_1(\boldsymbol{x};\ \lambda_1) d\boldsymbol{x} = \int_{\boldsymbol{x}\in R^n} I(\boldsymbol{x};\ \lambda_1 - 1) f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{I}\lambda_1^2) d\boldsymbol{x} \tag{15}$$

When P_1 is estimated, the optimal IS PDF for the initial intermediate failure event has a similar form to Eq. (6).

$$h_1^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_1) = \frac{\eta_1(\boldsymbol{x};\lambda_1)}{P_1} = \frac{I(\boldsymbol{x};\ \lambda_1 - 1) f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{I}\lambda_1^2)}{P_1} \tag{16}$$

Using $h_1^*(\boldsymbol{x}; \lambda_1)$, we can estimate the probability of the next-stage intermediate failure event specified by $\eta_2(\boldsymbol{x}; \lambda_2) = I(\boldsymbol{x}; \lambda_2 - 1)\ f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{I}\lambda_2^2)$, and repeat this process until we reach the target failure event specified by $\eta_T(\boldsymbol{x};\ \lambda_T)$. Then, the failure probability is expressed as follows:

$$P_F = P_1 \prod_{j=1}^{T-1} \int_{\boldsymbol{x}\in R^n} \frac{I(\boldsymbol{x}; \lambda_{j+1} - 1) f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{I}\lambda_{j+1}^2)}{I(\boldsymbol{x}; \lambda_j - 1) f(\boldsymbol{x}; \boldsymbol{I}\lambda_j^2)} \cdot h_j^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_j) d\boldsymbol{x} \tag{17}$$

Let $\boldsymbol{x}_j^k, k = 1, 2, \dots, n_j$ be the i.i.d. samples according to $h_j^*(\boldsymbol{x};\ \lambda_j)$ in the jth stage, the estimated value of the failure probability, expressed by Eq. (17), is obtained as follows:

$$\hat{P}_F = P_1 \prod_{j=1}^{T-1} \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} \frac{I(\boldsymbol{x}_j^k; \lambda_{j+1} - 1) f(\boldsymbol{x}_j^k; \boldsymbol{I}\lambda_{j+1}^2)}{I(\boldsymbol{x}_j^k; \lambda_j - 1) f(\boldsymbol{x}_j^k; \boldsymbol{I}\lambda_j^2)} \tag{18}$$

4. Numerical Experiments

We conduct a performance evaluation and comparison of the ISs based on subset simulation and scaling of PDF, and the IS based on the combination of two methods by one parameter control through numerical examples. We use the four-branch system function and the polynomial square root function as typical LSFs for performance comparison.

4.1. Four-Branch System Function

We consider the reliability problem with the two-dimensional four-branch system function $\varphi(\boldsymbol{x})$.

$$\varphi(\boldsymbol{x}) = 10 - \min \begin{cases} 3 + 0.1(x_1 - x_2)^2 - \dfrac{x_1 + x_2}{\sqrt{2}} \\ 3 + 0.1(x_1 - x_2)^2 + \dfrac{x_1 + x_2}{\sqrt{2}} \\ (x_1 - x_2) + \dfrac{7}{\sqrt{2}} \\ (x_2 - x_1) + \dfrac{7}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

The result of estimating $P(g_{12}(\boldsymbol{x}) < 0)$ by taking a sufficiently large number of samples with a LSF $g_{12}(\boldsymbol{x}) = 12 - \varphi(\boldsymbol{x})$ is 1.18×10^{-6} [12]. The results of estimating the failure probability P_F, relative bias RB and relative standard error RE with varying number of samples are given in Table 1.

For the sake of brevity of the table, in the future, the table will denote method 1 by the subset simulation, method 2 by the scaling of PDF, method 3 by the proposed method and NoS by the number of samples.

Table 1 – Results for the four–branch system with a reference failure probability value of $1.18 \cdot 10^{-6}$.

NoS	Method	$\hat{P}_F$	RB$(\hat{P}_F)$ (%)	RE$(\hat{P}_F)$ (%)
1 000	Method 1	$9.8752 \cdot 10^{-7}$	–16.31	168.59
	Method 2	$1.3403 \cdot 10^{-6}$	13.58	150.35
	Method 3	$1.0504 \cdot 10^{-6}$	–10.98	31.17
1 500	Method 1	$1.1099 \cdot 10^{-6}$	–5.94	72.24
	Method 2	$1.2738 \cdot 10^{-6}$	7.95	80.18
	Method 3	$1.1767 \cdot 10^{-6}$	–0.28	24.47
2 000	Method 1	$1.0430 \cdot 10^{-6}$	–11.61	75.64
	Method 2	$1.2156 \cdot 10^{-6}$	3.02	69.27
	Method 3	$1.1774 \cdot 10^{-6}$	–0.22	17.74
2 500	Method 1	$9.7535 \cdot 10^{-7}$	–17.34	26.38
	Method 2	$1.2385 \cdot 10^{-6}$	4.96	33.57
	Method 3	$1.1749 \cdot 10^{-6}$	–0.43	13.95

4.2. Polynomial Square Root Function

The polynomial square root function is used as a typical test function in the study of reliability problems, which is expressed as follows [12] :

$$\varphi(\boldsymbol{x}) = 14 - \sqrt{(10 - x_1)^2 + (x_2 + 7)^2 + 10(x_1 + x_2)^2}$$

For a threshold T of 6, the correct failure probability $P(\varphi(\boldsymbol{x}) > T)$ is 2.35×10^{-6} [12]. In this case, the LSF $g_6(\boldsymbol{x})$ is expressed as follows:

$$g_6(\boldsymbol{x}) = 6 - \varphi(\boldsymbol{x})$$

The results of estimating the failure probability P_F, relative bias RB and relative standard error RE with varying number of samples are given in Table 2.

Table 2 – Results for the polynomial square root function with a reference failure probability value of $2.35 \cdot 10^{-6}$.

NoS	Method	$\hat{P}_F$	RB$(\hat{P}_F)$ (%)	RE$(\hat{P}_F)$ (%)
1 000	Method 1	$1.5149 \cdot 10^{-6}$	–35.53	112.97
	Method 2	$1.4592 \cdot 10^{-6}$	–37.91	129.56

	Method 3	$2.4820 \cdot 10^{-6}$	5.62	58.91
1 500	Method 1	$2.5397 \cdot 10^{-6}$	8.07	48.71
	Method 2	$2.6185 \cdot 10^{-6}$	11.43	53.33
	Method 3	$2.2824 \cdot 10^{-6}$	–2.88	27.32
2 000	Method 1	$2.4568 \cdot 10^{-6}$	4.54	55.92
	Method 2	$2.4692 \cdot 10^{-6}$	5.07	60.26
	Method 3	$2.4031 \cdot 10^{-6}$	2.26	23.80
2 500	Method 1	$2.2972 \cdot 10^{-6}$	–2.25	21.10
	Method 2	$2.2452 \cdot 10^{-6}$	–4.46	23.54
	Method 3	$2.3098 \cdot 10^{-6}$	–1.71	14.28

5. Conclusions

We have proposed a method to realize one-parameter control by integrating the parameter in subset simulation and the scaling parameter of PDF as a strategy to allow more samples to fall into the failure region during sampling.

The effectiveness of the proposed method has been verified by numerical experiments with some typical LSFs. Numerical results show that the proposed method is effective in cases where the failure probability is as small as 10^{-6}.

1. Lemaire M, Chateauneuf A, Mitteau J–C., 2009. Structural reliability. Wiley–ISTE.
2. Rackwitz R., 2001. Reliability analysis – a review and some perspectives. Struct Saf., 23(4), 365–395.
3. Der Kiureghian A., 2005. First– and second–order reliability methods. In: Nikolaidis E, Ghiocel DM, Singhal S, editors. Engineering design reliability handbook., CRC Press; Ch. 14.
4. Rubinstein RY, Kroese DP., 2017. Simulation and the Monte Carlo method. 3rd Edition Springer.
5. Au S, Beck J., 1999. A new adaptive importance sampling scheme for reliability calculations. Struct Saf., 21(2), 135–158.
6. Hohenbichler M, Rackwitz R., 1988. Improvement of second–order reliability estimates by importance sampling. J Eng Mech., 114(12), 2195–2199.
7. Koutsourelakis P, Pradlwarter H, Schuëller G., 2004. Reliability of structures in high dimensions, Part I: Algorithms and Applications. Probab Eng Mech., 19(4), 409–417.
8. de Boer PT, Kroese DP, Mannor S, Rubinstein RY., 2005. A tutorial on the cross–entropy method. Ann Oper Res., 134(1), 19–67.
9. Yang DY, Teng J, Frangopol DM., 2017. Cross–entropy–based adaptive importance sampling for time-dependent reliability analysis of deteriorating structures. Struct Saf., 66, 38–50.
10. Geyer S, Papaioannou I, Straub D., 2019. Cross entropy–based importance sampling using Gaussian densities revisited. Struct Saf., 76, 15–27.
11. Papaioannou I, Papadimitriou C, Straub D., 2016. Sequential importance sampling for structural reliability analysis. Struct Saf., 62, 66–75.
12. Morio J, Balesdent M., 2016. Estimation of Rare Event Probabilities in Complex Aerospace and Other Systems; A Practical Approach. WP.
13. Bucher C., 1988. Adaptive sampling – an iterative fast Monte Carlo procedure. Struct Saf., 5, 119–126.
14. Dubourg V, Sudret B, Deheeger F., 2013. Metamodel–based importance sampling for structural reliability analysis. Prob Eng Mech., 33, 47–57.
15. Papaioannou I, Betz W, Zwirglmaier K, Straub D., 2015. MCMC algorithms for subset simulation. Prob Eng Mech., 41, 89–103.
16. Beaurepaire P, Jensen HA, Schuëller GI, Valdebenito MA., 2013. Reliability–based optimization using bridge importance sampling. Prob Eng Mech., 34, 48–57.
17. Peilin Zhao and Tong Zhang., 2015. Stochastic optimization with importance sampling for regularized loss minimization. In international conference on machine learning, PMLR, pages 1–9.

18. Sebastian U Stich, Anant Raj, and Martin Jaggi., 2017. Safe adaptive importance sampling. Advances in Neural Information Processing Systems, 1–17.
19. Art Owen and Yi Zhou., 2000. Safe and effective importance sampling. J. Amer. Statist. Assoc., 95(449), 135–143.
20. Randal Douc, Arnaud Guillin, J–M Marin, and Christian P Robert., 2007. Minimum variance importance sampling via population monte carlo. ESAIM: Probability and Statistics, 11, 427–447.

BIVARIATE NORMAL-GEOMETRIC DISTRIBUTION WITH FGM COPULA

Ri Sung Hyon, Kim Hyon A, Kim Kwang Hyok
Faculty of Applied Mathematics, Kim Chaek University of Technology,
Pyongyang, DPR Korea
lsh6579@star-co.net.kp

It is of practical importance to construct new effective statistical model for discrete and continuous data arising in the real world. The bivariate distribution with FGM copula whose two marginal distributions are normal and geometric, respectively, is proposed. The explicit characteristics and the moment generating function of the distribution are derived. Also, the conditional distributions and their characteristics of the distribution are obtained.

1. Introduction

In analyzing data from reliability, economics, health sciences and other advanced areas, probability distributions are effectively used. Many new distributions are created to describe real-world data more accurately.

Copulas are an important tool to express the relationship between random variables and they are widely used in constructing multidimensional distributions (see [10], [11] and [19]). Using copula, the bivariate normal-Weibull distributions [23], generalized Rayleigh distributions [7], and bivariate Fréchet distributions [3] have been studied. In [5], [6] and [16], several bivariate distributions have been constructed using Marshall-Olkin copula.

The Farlie-Gumbel-Morgenstern (FGM) copula proposed by Morgenstern in 1956 is one of the most widely known parametric copula. The bivariate FGM copula is given as:

$$C(u_1,u_2)=u_1u_2[1+\alpha(1-u_1)(1-u_2)],\ -1\le\alpha\le 1.$$

Let (X_1, X_2) have FGM copula, then the cumulative distribution function (cdf) of (X_1, X_2) is expressed as:

$$F(x_1,x_2)=F_1(x_1)F_2(x_2)[1+\alpha(1-F_1(x_1))(1-F_2(x_2))],\quad (x_1,x_2)\in R^2, \tag{1}$$

where $F_i(x)$ (i=1, 2) is the cdf of X_i.

Using FGM copula, the continuous bivariate distributions of different types, e. g., a bivariate exponential distribution with normal and exponential marginal [9], a bivariate generalized exponential [1], a bivariate Weibull distribution [2], a bivariate modified Weibull distribution [20], and a bivariate Teissier distribution [22] have been presented and their statistical properties were investigated.

For discrete bivariate distributions, we refer to [12]. The bivariate geometric and Poisson distributions [21] and a bivariate discrete generalized exponential distribution [17] have been proposed and their properties and parameter estimation have been studied. Several negatively correlated bivariate Poisson distributions have been discussed in [8] and a model with Poisson marginals that allows negative correlation have been developed in [15]. Nelsen [18] has constructed probability functions for bivariate discrete random variables with any correlation using convex linear combinations of probability functions for Fréchet marginals. A bivariate discrete Weibull distribution that is a discrete analogy of the Marshall-Olkin bivariate Weibull distribution have been introduced and its various properties have been studied in [14].

In [13], a bivariate continuous-discrete distribution with independent identically distributed (i.i.d.) exponential sum and geometric marginal distributions has been constructed and used to analyze the finance data.

However, there are few papers on the results concerning the distribution with continuous and discrete marginal distributions, and to the best of our knowledge, the construction of a continuous-discrete model using a copula has not been discussed.

In the real world, as the grade, classification index, etc. are represented by discrete variables, its observation and the continuous index will require various continuous-discrete model.

The aim of this paper is to propose a bivariate normal-geometric distribution using FGM copula and show its properties.

2. Bivariate normal-geometric distribution and its characteristics

Let X_1 and X_2 be two i.i.d. copies of a random variable X with a cdf $G(x)$, then the cdf of $X^{(2)}=\max\{X_1, X_2\}$ is $G^{(2)}(x)=G^2(x)$. Therefore, Eq. (1) can be expressed as:

$$F(x_1,x_2)=F_1(x_1)F_2(x_2)+\alpha[F_1(x_1)-F_1^{(2)}(x_1)] \times[F_2(x_2)-F_2^{(2)}(x_2)] \quad (2)$$

Let $p_k=P\{K=k\}$, $k=0,\pm1,\pm2,\cdots$ be the probability mass function (pmf) of a random variable K taking a nonnegative integer values, and the pmf of $K^{(2)}=\max\{K_1, K_2\}$ is expressed as:

$$p_k^{(2)}=p_k^2+2p_k\sum_{j<k}p_j,\ k=0,\pm1,\pm2,\cdots.$$

Proposition 2.1. Let X be a continuous random variable with the probability density function (pdf) $f(x)$ and K a discrete random variable with the pmf $p_k=P\{K=k\}$, $k=0,\pm1,\pm2,\cdots$, and (X, K) have FGM copula. Then the pdf of (X, K) is expressed as:

$$f(x,k)=\frac{d}{dx}P\{X\le x,K=k\} =f(x)p_k+\alpha(f(x)-f^{(2)}(x))(p_k-p_k^{(2)}), \quad (3)$$

where $f^{(2)}(x)$ is the pdf of $F^{(2)}(x)$.

Proof. From (2), we have

$$P\{X\le x,\ K=k\}=F(x)p_k+\alpha(F(x)-F^{(2)}(x)) \times(p_k-p_k^{(2)}).$$

Differentiating the above expression by x yields the result of the proposition.

Let X be a standard normal random variable, then the cdf and pdf of $X^{(2)}$ are $\Phi^2(x)$ and $\varphi^{(2)}(x)=2\varphi(x)\Phi(x)$, respectively. This is the skew normal distribution with slant parameter 1. The mathematical expectation and variance of $X^{(2)}$ are

$$EX^{(2)}=\frac{1}{\sqrt{\pi}},\ VarX^{(2)}=1-\frac{1}{\pi},$$

respectively [4].

Let K follows geometric distribution $G(p)$, i. e. $P\{K=k\}=pq^{k-1}=q^{k-1}-q^k$, $k=1,2,\cdots$, then the pmf of $K^{(2)}$ is as:

$$P\{K^{(2)}=k\}=2(q^{k-1}-q^k)-(q^{2k-2}-q^{2k}), \quad k=1,2,\cdots,$$

Definition 2.1. Let the bivariate random variable (X, K)have the FGM copula, and $X\sim N(\mu, \sigma^2)$ and $K\sim G(p)$. Then, we say that (X, K) follows the bivariate normal-geometric distribution with FGM copula and denote by $(X, K)\sim NGF(\mu, \sigma^2, p; \alpha)$.

2.1 Characteristics and moment generating function

First, consider the case where the continuous marginal is the standard normal distribution.

From (3), the pdf of $(X_0, K) \sim NGF(0,1, p; \alpha)$ is obtained as:

$$f_0(x,k) = \varphi(x)[(q^{k-1} - q^k) + \alpha(1-2\Phi(x)) \times ((q^{2k-2} - q^{2k}) - (q^{k-1} - q^k))], \quad (4)$$

Proposition 2.2. If $(X_0, K) \sim NGF(0,1, p; \alpha)$, then the correlation coefficient between X_0 and K is obtained as:

$$r(X,K) = \frac{\alpha\sqrt{q}}{\sqrt{\pi}(1+q)}.$$

Proof. Using $EX_0=0$, $EX_0^{(2)} = 1/\sqrt{\pi}$,

$$EK = \frac{1}{1-q},\ EK^{(2)} = \frac{1+2q}{(1-q)(1+q)},$$

the result of proposition is obtained. □

Proposition 2.3. The moment generating function of $(X_0, K) \sim NGF(0,1, p; \alpha)$ is given by

$$M_0(t,z) = Ee^{tX_0+zK} = e^{\frac{t^2}{2}}\left[\frac{pe^z}{1-qe^z} + \alpha\left(1-2\Phi(\frac{t}{\sqrt{2}})\right)\left(\frac{pe^z}{1-qe^z} + \frac{p(1+q)e^z}{1-q^2e^z}\right)\right]$$

Proof . From Eq. (3), it follows that

$$M_0(t,z) = M_{X_0}(t)M_K(z) + \alpha(M_{X_0}(t) - M_{X_0}^{(2)}(t))(M_K(z) - M_K^{(2)}(z)).$$

The moment generating functions of X_0, K $X_0^{(2)}, K^{(2)}$ are expressed as [4]:

$$M_{X_0}(t) = e^{\frac{t^2}{2}},\ M_{X_0}^{(2)}(t) = 2e^{\frac{t^2}{2}}\Phi(\frac{t}{\sqrt{2}}),$$

$$M_K(z) = \frac{pe^z}{1-qe^z},\quad M_K^{(2)} = \frac{2pe^z}{1-qe^z} - \frac{p(1+q)e^z}{1-q^2e^z}.$$

The above expressions give the result of the proposition.

Let $X = \mu + \sigma X_0$, then $(X, K) \sim NGF(\mu, \sigma^2, p; \alpha)$, for any $\sigma > 0$. From Eq. (4), the joint pdf of (X, K) is obtained as follows.

$$f(x,k) = \frac{1}{\sigma}\varphi(\frac{x-\mu}{\sigma})\left[(q^{k-1} - q^k) + \alpha\left(1-2\Phi(\frac{x-\mu}{\sigma})\right) \times ((q^{2k-2} - q^{2k}) - (q^{k-1} - q^k))\right].$$

The following theorem summarizes the results for a bivariate normal geometric distribution.

Theorem 2.1. The mathematical expectation and covariance matrix of $(X, K) \sim NGF(\mu, \sigma^2, p; \alpha)$ are respectively as:

$(EX, EK) = (\mu, 1/p)$,

$$Cov(X,K)=\begin{pmatrix}\sigma^2 & \dfrac{\alpha\sigma q}{\sqrt{\pi}\,p(1+q)}\\ \dfrac{\alpha\sigma q}{\sqrt{\pi}\,p(1+q)} & q/p^2\end{pmatrix}.$$

Also, the moment generating function of (X, K) is

$$M(t,z)=Ee^{tX+zK}=e^{\mu t+\frac{\sigma^2t^2}{2}}\left[\frac{pe^z}{1-qe^z}\right.$$
$$\left.+\alpha\left(1-2\Phi(\frac{\sigma t}{\sqrt{2}})\right)\left(\frac{pe^z}{1-qe^z}+\frac{p(1+q)e^z}{1-q^2e^z}\right)\right].$$

2.2 Conditional distributions and conditional characteristics

The conditional distributions and conditional characteristics of the bivariate normal-geometric distribution are considered.

Let $(X, K)\sim NGF(\mu, \sigma^2, p; \alpha)$. The conditional distribution of X given $K = k$ is derived as:

$$f_{X|K=k}(x)=[1+\alpha(q^{k-1}+q^k-1)]\left(\frac{1}{\sigma}\varphi(\frac{x-\mu}{\sigma})\right)$$
$$-\alpha(q^{k-1}+q^k-1)\left(\frac{2}{\sigma}\varphi(\frac{x-\mu}{\sigma})\Phi(\frac{x-\mu}{\sigma})\right).$$

Also, the conditional distribution of K given $X = x$ is derived as:

$$f_{K|X=x}(k)=[1-\alpha(1-2\Phi(\frac{x-\mu}{\sigma}))](q^{k-1}-q^k)$$
$$+\alpha(1-2\Phi(\frac{x-\mu}{\sigma}))(q^{2k-2}-q^{2k})$$

By simple calculation, the conditional mathematical expectations and conditional variances are obtained as follows:

$$E(X|K=k)=\mu-\frac{\alpha\sigma}{\sqrt{\pi}}(q^{k-1}+q^k-1)$$

$$Var(X|K=k)=\sigma^2\left(1-\frac{\alpha^2(q^{k-1}+q^k-1)^2}{\pi}\right)$$

$$E(K|X=x)=\frac{1}{1-q}-\alpha(1-2\Phi(\frac{x-\mu}{\sigma}))]\frac{q}{1-q^2}$$

$$Var(K|X=x)=\frac{q}{(1-q)^2}-\alpha(1-2\Phi(\frac{x-\mu}{\sigma}))\frac{q(1+q^2)}{(1-q^2)^2}$$
$$+\alpha^2(1-2\Phi(\frac{x-\mu}{\sigma}))^2(\frac{q}{1-q^2})^2$$

3. Conclusions

We have introduced the bivariate normal-geometric distribution with FGM copula. The characteristics of the distribution and the moment generating function have been obtained. Also, the conditional distributions and conditional characteristics have been shown.

The distribution would be widely used in modeling and analysis of continuous-discrete data.

1. Abd Elaal M. K., Jarwan R. S., 2017. Inference of bivariate generalized exponential distribution based on copula functions, Appl. Math. Sci. 11(24), 1155–1186.
2. Almetwally E. M., Muhammed H. Z., El-Sherpieny E. S. A., 2020. Bivariate Weibull distribution: properties and different methods of estimation, Ann. Data Sci. 7(1), 163–193.
3. Almetwally E. M., Muhammed H. Z., 2020. On a bivariate Fréchet distribution, J. Stat. Appl. Probab. 9(1), 1– 21.
4. Azzalini A., Capitanio A., 2014. The Skew-Normal and Related Families, Cambridge University Press, 24-94.
5. Eliwa M. S., El-Morshedy M., 2020. Bivariate odd Weibull-G family of distributions: properties, Bayesian and non-Bayesian estimation with bootstrap confidence intervals and application, J. Taibah. Univ. Sci. 14(1), 331–345.
6. El-Morshedy M., Alhussain Z. A., Atta D., Almetwally E. M., Eliwa M. S., 2020. Bivariate Burr X generator of distributions: properties and estimation methods with applications to complete and type-II censored samples, Mathematics 8(2), 1–31.
7. El-Sherpieny E. S., Almetwally E. M., 2019. Bivariate generalized rayleigh distribution based on Clayton Copula, In: Proceedings of the annual conference on statistics (54rd), Computer Science and Operation Research, Faculty of Graduate Studies for Statistical Research, Cairo University, 1–19.
8. Griffiths R. C., Milne R. K., Wood R., 1979. Aspects of correlation in bivariate Poisson distributions and processes, Austral. J. Statist. 21, 238–255.
9. Gumbel E. J., 1960. Bivariate exponential distributions, J. Am. Stat. Assoc. 55(292), 698–707.
10. Jaworski P., Durante F., Hardle W., Rychlik T., Copula Theory and Its Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, 3-254.
11. Joe H., 2014. Dependence modeling with copulas, CRC Press, Cambridge, 86-124.
12. Kocherlakota S., Kocherlakota, K. 1992. Bivariate Discrete Distributions. Marcel Dekker, New York, 48-125.
13. Kozubowski T. J., Panorska A. K., 2005. A mixed bivariate distribution with exponential and geometric marginal, Journal of Statistical Planning and Inference, 134, 501–520.
14. Kundu D., Nekoukhou V., 2019. On bivariate discrete Weibull distribution, Comm. Stat. Theory Methods, 48, 3464–3481.
15. Min H., He P., Li C., Yang L., Xiao F., 2024. The temporal and spatial characteristics of wind-photovoltaic hybrid power output based on a cloud model and copula function, Energies, 17, 1024.https://doi.org/10.3390/en 17051024, 1-13.
16. Muhammed H. Z., 2016. Bivariate inverse Weibull distribution, J. Stat. Comput. Simul. 86(12), 2335–2345.
17. Nekoukhou V., Kundu D., 2017. Bivariate discrete generalized exponential distribution. Statistics, 51, 1143–1158.
18. Nelsen R. B. 1987. Discrete bivariate distributions with given marginals and correlation, Comm. Statist. Simulation Comput., 16, 199–208.
19. Nelsen R. B., 2007. An introduction to copulas, Springer, 135-273.
20. Peres M., Achcar J. A., Martinez E. Z., 2018. Bivariate modifed Weibull distribution derived from Farlie-Gumbel-Morgenstern copula: a simulation study, Electr. J. Appl. Stat. Anal. 11(2), 463–488.
21. Piperigou V. E., 2009. Discrete distributions in the extended FGM family: The p.g.f. approach, Journal of Statistical Planning and Inference, 139, 3891 – 3899.
22. Tyagi S., 2024. On bivariate Teissier model using Copula: dependence properties, and case studies, Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag, 15(6), 2483–2499.
23. Verrill S. P., Evans J. W., Kretschmann D. E., Hatfield C. A., 2015. Asymptotically efficient estimation of a bivariate Gaussian–Weibull distribution and an introduction to the associated pseudo-truncated Weibull. Commun. Stat. Theory Methods, 44(14):2957–2975.

RESEARCH ON IMPROVING ACCURACY OF ELECTRONIC COMPASS USING IMPROVED ELLIPSE FITTING MODEL

Yong Rim Ri, Kwang Song Han, Kwang Song Kim, Hyok Ri
Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kim Chaek University of Technology, Pyongyang, DPR Korea
kgs96120@star-co.net.kp

This paper describes the method for compensating accidental error and improving ac curacy of digital magnetic compass by using robust ellipse fitting.

The heading (ψ) in ship is defined as the angle between the N-axis of north-east-dow n (NED) reference frame and the X-axis of the horizontal coordinate system (X, Y, Z). Thus , if the forward direction of the ship is coincident with Earth's magnetic north, heading angl e is 0° and is changed in the range from 0° to 360° along the clockwise direction.

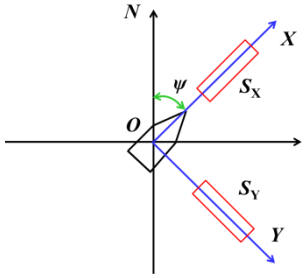


Fig. 1 Principle of heading measurement

When the horizontal component of the earth magnetic field is H_0, two components of the earth magnetic field which is measured from S_x and S_y , magnetic sensors can be calc ulated as follows:

$$\begin{cases} H_X = H_0 \cos\psi \\ H_Y = -H_0 \sin\psi \end{cases} \tag{1}$$

then heading angle can be expressed as:

$$\psi = -\arctan\left(\frac{H_Y}{H_X}\right) \tag{2}$$

According to the Eq. (2), it can be seen that the locus of the Earth's magnetic field v ector, which consists of the measurements from two sensitive axes of sensors, is a circle reg ardless of the disturbance magnetic field applied on the magnetic compass. When the magne tic field strength, H_X and H_Y measured by two sensors are changed to H_{X1} and H_{Y1} due to the influence of external interference giving to the digital magnetic compass, the relations hip between them is written as

$$\begin{bmatrix} H_X \\ H_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{XX} & a_{XY} \\ a_{YX} & a_{YY} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{X1} \\ H_{Y1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{XX} & a_{XY} \\ a_{YX} & a_{YY} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_X \\ b_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{XX} & c_{XY} \\ c_{YX} & c_{YY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{X1} \\ H_{Y1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_X \\ d_Y \end{bmatrix} \tag{4}$$

where, $a_{XX}, a_{XY}, a_{YX}, a_{YY}$ are the coefficients related to the hysteresis curve of the corr esponding soft magnetic material. b_X and b_Y are the errors that is molded by the hard magne tic material and the zero-point change of the circuit.

This method was known as traditional ellipse approximation method.

To overcome this drawback of the traditional ellipse approximation method, in this r esearch, a novel objective function using the elliptic geometric definition is established. An ellipse is a locus where the sum of distances from two fixed points (foci) in the plane is a co

nstant (twice the long radius). For example, if p_i is a point of an ellipse, then

$$\|p_i - c_1\| + \|p_i - c_2\| = 2a \tag{5}$$

where $\|\cdot\|$ represents norm, c_1 and c_2 are two foci of an ellipse, a is the long radius o f the ellipse. When magnetic interference is only present in the magnetic compass and no ot her noise effects, the relationship between the measured values p_i due to the effect of magne tic interference and the foci of an original ellipse can be represented as:

$$\|p_i - c_1\| + \|p_i - c_2\| - 2a = 0 \tag{6}$$

Thus, the ellipse approximation problem can be defined as an optimization problem t hat minimizes the new geometric objective function.

$$\min_{c_1,c_2,a} \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\|p_i - c_1\| + \|p_i - c_2\| - 2a\right)^2 \tag{7}$$

where n is the number of measurements.

When ellipse approximation was performed using the objective function (6), the mag nitude was not determined accurately, and through the analysis for the expected values of th e measurements, an angle-dependent weight $\frac{1}{1+\cos\beta_i}$ is applied to the objective function (6), and the modified objective function is written as;

$$\min_{c_1,c_2,a} \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{1+\cos\beta_i}\left(\|p_i - c_1\| + \|p_i - c_2\| - 2a\right)^2 \tag{8}$$

By using cosine theorem, we can rewrite Eq. (8) as follows.

$$\min_{c_1,c_2,a} \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{2\|p_i - c_1\|\cdot\|p_i - c_2\|}{\left(\|p_i - c_1\| + \|p_i - c_2\|\right)^2 - \|c_1 - c_2\|^2}\left(\|p_i - c_1\| + \|p_i - c_2\| - 2a\right)^2 \tag{9}$$

From the simulation based on objective function (9), we can know that not only mag nitude of magnetic field but also the orientation of long radius can't be estimated exactly. T his is because, in some cases, estimating process converge to local minimum point converge nt using Eq. (9).

In order to solve this problem, an objective function with a weighting factor (m) acc ording to number of iterations was proposed.

$$\min_{c_1,c_2,a} \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{1+m\cos\beta_i}\left(\|p_i - c_1\| + \|p_i - c_2\| - 2a\right)^2 \tag{10}$$

where m are the tuning parameters varying from zero to one. When m =0, Eq. (10) is equal to previous objective function (7), so that the direction of the long radius can be estim ated accurately. And also, when m =1, Eq. (10) is equal to the objective function (8), so that the phenomena which the long radius becomes longer and local convergence can be overca me. Therefore, we can adjust to converge to the correct value by changing m.

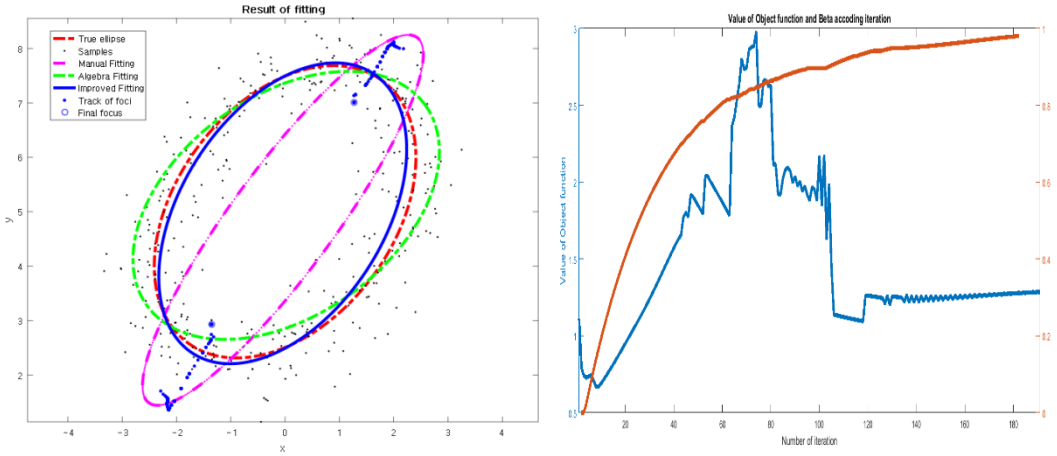
In order to verify the effectiveness of proposed method, we compared the approxima tion results of the previous algorithm (algebraic ellipse approximation) with results of the pr oposed ellipse approximation by increasing the noise level. In this simulation, the noise was applied to ellipse which was expressed as a following equation and the estimation characteri stics of proposed algorithms was analyzed with respect to noise levels.

$$36x^2 - 24xy + 29y^2 + 120x - 290y + 545 = 0 \tag{11}$$

Fig. 2 shows the comparison of estimation performance for each algorithms with noi se level.

In Fig. 2a, the red dashed line is the true ellipse, the blue line declares the result appr oximated from objective function (10), and the black dots are the samples with normal rand om noise, which has standard deviation of 0.4. The pink dash-dotted line manifests the resul

t applied compensating method for major and minor axis of ellipse introduced in reference [15]. The green dashed line expresses the algebraic ellipse fitting result by least squares meth od. In Fig. 2b, fox red curve shows the change of m_j and blue curve manifests the variation of objective function value. Through the simulation, the suitable estimation characteristics can be obtained when ρ= 0.97 and Th_0 = 0.6. Fig. 2a shows that the proposed approach method has a better estimation performance than the algebraic ellipse approach. From Fig. 2 b, it can be demonstrated that the proposed approximation converges successfully to the target value without sliping away to the local minimum.



a) b)

Fig. 2 Estimation characteristics of each algorithm with normal random noise. (a) ell ipse approximation result when σ=0.4. (b) Variation of the weight coefficient m

Fig. 3 shows the results of calculating the heading with the values obtained by Eq. (4) after obtaining the compensation coefficients and errors by using the algebraic and improv ed ellipse approximations, compare with the actual heading. As shown in Fig. 2a, by applyi ng the improved ellipse approximation, the angle between main axis of ellipse and X axis $\chi = 0.85 rad$, the length of long radius $a = 2.91$, the length of short radius $b = 2.01$, and the co ordinates of the elliptse center (-0.004,5.113) were obtained. Hence, the error compensation coefficients can be calculated as follows:

$$\begin{bmatrix} a_{XX} & a_{XY} \\ a_{YX} & a_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & a/b \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\chi & -\sin\chi \\ \sin\chi & \cos\chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5420 & -0.8404 \\ 1.3783 & 0.8888 \end{bmatrix} \tag{12}$$

At the same time, the compensation errors is obtained as:

$$\begin{bmatrix} c_{XX}\, c_{XY} \\ c_{YX}\, c_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{XX} & a_{XY} \\ a_{YX} & a_{YY} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.5420 & 0.5124 \\ -0.8404 & 0.3304 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix} d_X \\ d_Y \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} a_{XX} & a_{XY} \\ a_{YX} & a_{YY} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 4.972 \\ -0.043 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.5244 \\ -1.6793 \end{bmatrix} \tag{14}$$

Thus, the result of the error compensation by Eq. (4) is suggested in Fig. 3.

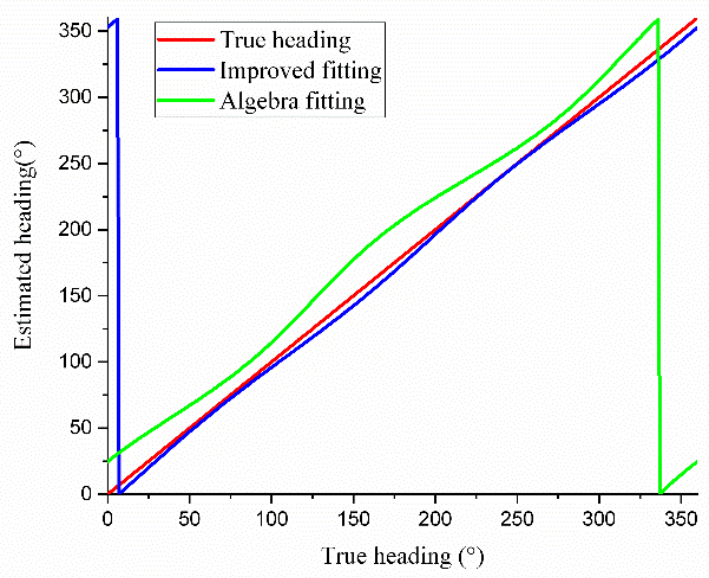


Fig. 3 Estimating Heading based on algebraic ellipse approximation and proposed ell ipse approach (σ=0.4)

In this figure, transverse axis represents index heading and longitudinal axis shows t he estimated heading. Then, the blue curve indicates algebraic ellipse approximation by usin g least square method and green curve exhibits the results by the proposed ellipse approach.

As shown in this simulation results, it can be known that the improved ellipse appro ximation algorithm has high noise suppression performance and adaptability.

In order to prove the proposed alghorithm practically, several experiments were carri ed out with a self-developed electronic compass fixed on a non-magnetic turntable. The boa rd under the turntable is marked with rotational angles.

The magnetic field measurements in two axes of the magnetometer were calibrated b y applying above simualated three methods and heading data were produced. Without distur bance, 240 samples were obtained by recording the heading values displayed in the compas. At that time, compass was fixed in the turntable, and is rotated at 15° intervals 10 times. In t his way, 10 samles were taken for each orientation, the maximum absolute errors and the sta ndard deviations were acquired. It can be displayed from Fig. 4 and Table I.

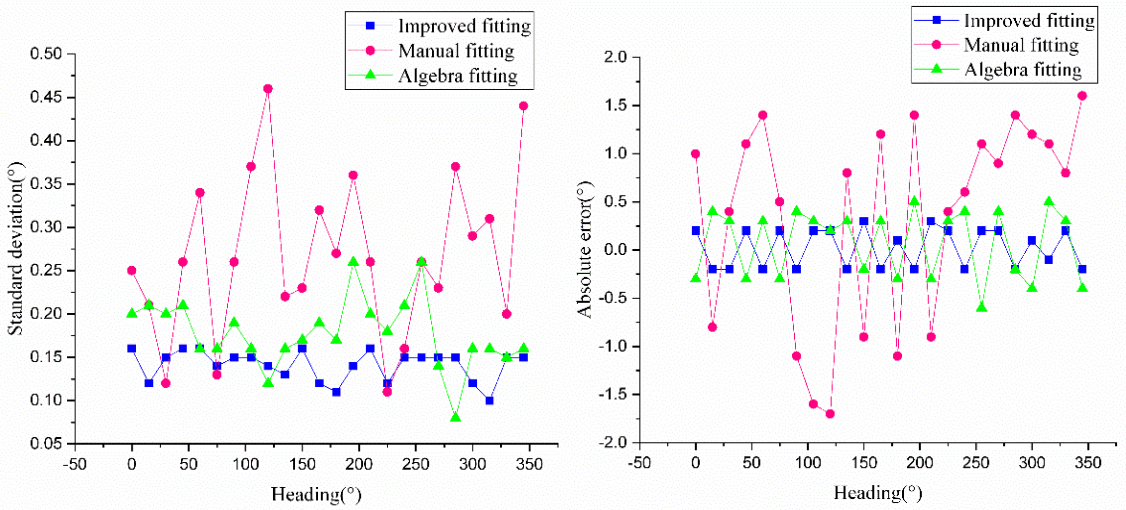


Fig. 4 Heading error with different methods, (a) standard deviation; (b) absolute error

Table 1 – Comparision of three methods

Method / Result	Manual fitting	Algebra fitting	Improved fitting
Maximum standard deviation	0.46	0.25	0.18
Maximum absolute error	1.6	0.6	0.3

To avoid the influence of laboratory condition, the experiments were repeated in various locations, and the maximum absolute errors and standard deviations with the number of iterations are shown in Figs. 5 and 6.

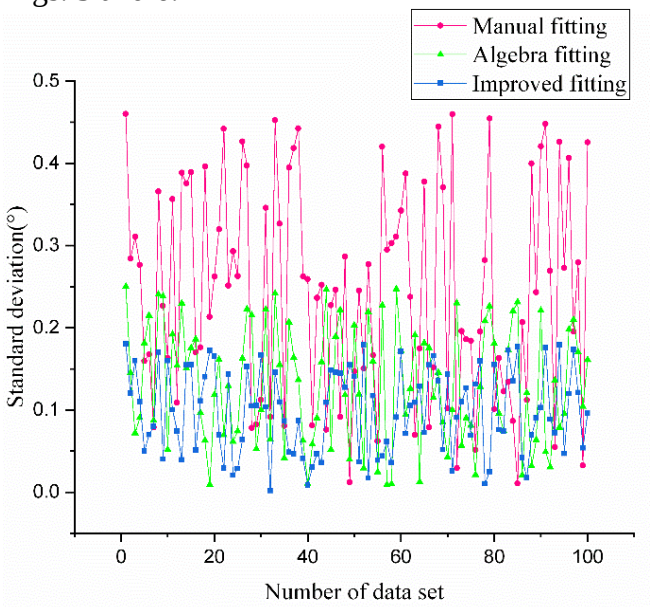


Fig. 5 Standard deviation with number of iteration

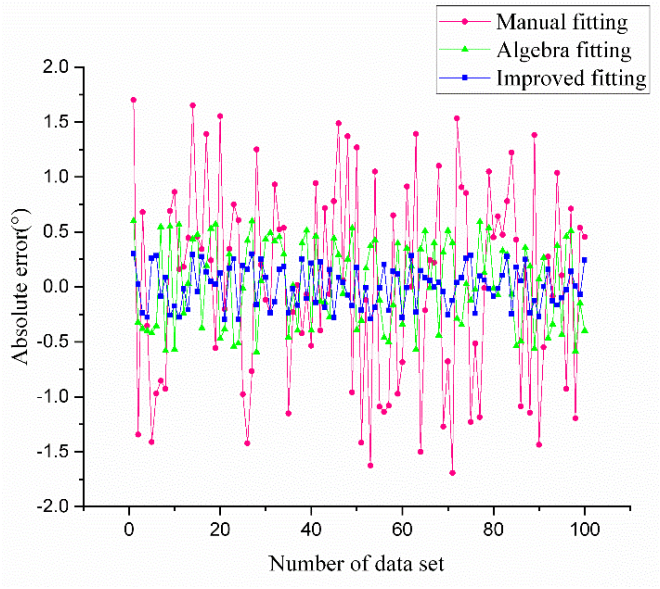


Fig. 5 Absolute error with number of iteration

From Fig. 5 and 6, it can be shown that the proposed alghorithm can significantly improve the heading estimation accuracy regardless of the various experimental conditions and locations.

1. N. Yadav, C. Bleakley, Fast calibration of a 9-DOF IMU using a 3 DOF position tracker and a semi-random motion sequence. Measurement 90, 192–198 (2016).
2. Z. Chu, X. Lin, K. Gao, C. Chen, Error-separation method for the calibration of magnetic compass, Sensors and Actuators A 250, 195-201 (2016).
3. W. Yan, H. Li, Y. Jin, Z. Wang, G. Shi, A Fast Magnetic Deviation Calibration Alghorithm for Tri-Axial Electronic Compass. IEEE control and intelligent system 2016. International conference 7, 131-134 (2016).
4. YU Qiuyue, CHENG Lei, ZHANG Qinyan, CHEN Yang, WU Huaiyu, ZHU Quanmin, WANG Yongji, Liu Nian, Research on Magnetic Compass Calibration for Air-Ground Amphibious Robot System, 35th Chinese Control Conference, July. 6172-6177 (2016).
5. B. Andò, S. Baglio, S. Frisenna, C. O. Lombardo, V. Marletta, A methodology for the compensation of compass heading estimation for the effect of magnetic influences, IEEE, 1-5 (2016).
6. Jacky C. K. Chow, Jeroen D. Hol, Henk Luinge, Tightly-Coupled Joint User Self-Calibration of Accelerometers, Gyroscopes, and Magnetometers, 1-20 (Drones 2018).
7. Shimin Fu, Likai Sun, Hui Huang, Na Qi, Development of High-precision Magnetic Compass Sensor Based on Magnetic Induction, IEEE, The 49th R esearch Institute ofChina Electronics Technol ogy Group Corporation, 485-488(2016).
8. Xiao YANG, Jingjing LIAN, Hongxiang REN, Realization of 3D Virtual Magnetic Compass and Evaluation System, IEEE, 2015 International Conference on Virtual Reality and Visualization, 312-317(2015).
9. Y. Qiuyue, C. Lei, Z. Qinyan, C. Yang, W. Huaiyu, Z. Quanmin, Y. J. Wang, N. Liu, Research on Magnetic Compass Calibration for Air-Ground Amphibious Robot System. Proceedings of the 35th Chinese Control Conference, 6172-6177(2016).
10. A. Rashid, S. Shah, A. Rehman, Calibration of Flux Gate Compass for Underwater Applications. 2016 International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST). IEEE, 1-6(2016).
11. J. Ignacio, Sotés, Iranzu, Basterretxea-Iribar, Imanol, Towards an Improvement of Magnetic Compass Accuracy and Adjustment. Cambridge University Press, 1325-1340 (2016).
12. Y. Chang, Z. Ning, J. Fu, Active Compensation Method for Strong Magnetic Interference of MEMS Electronic Compass. IEEE, 13 (2021).
13. Hao, Y. kun, Zhang, X. Lei, X. Sheng, An Intelligent Ellipsoid Calibration Method Based on the Grey Wolf Algorithm for Magnetic Compass. Springer, 9 (2021).
14. S. I. Kasatkin, N. V. Plotnikova et al, Magnetic Location Based on a Magnetoresistive Compass, Physics, 1085-1089(2018).
15. P. F. Yan, Design of the electronic compass based on weak magnetic sensors and study of interference compensation algorithm. China, 48-50 (2015).

A METHOD USING CONSISTENT REFERENCE PREFERENCE RELATION IN INTERVAL-VALUED HESITANT FUZZY PREFERENCE RELATION

Kim Yun Gil, Paek Il Bom
Faculty of Applied Mathematics, Kim Chaek University of Technology,
Pyongyang, DPR Korea
kyg561213@star-co.net.kp

Interval-valued hesitant fuzzy preference relation (IVHFPR) are powerful in representing the judgment of decision makers (DMs) in the presence of uncertainty and hesitancy. This paper investigates the group decision making problem with IVHFPR. To do this, first, a method for analytically finding the reference multiplicative consistent preference relations for interval multiplicative preference relations (IMPRs) and interval fuzzy preference relations (IFPRs). Next, a method to extract the possible IVIFPR and interval FPRs from IVDHFPR and IVHFPR to find the priority weights is proposed. Next, a method for finding the priority weights is proposed by extracting a certain number of interval FPRs from IVHFPRs using a 0-1 mixed programming model. A method for group decision making with IVHFPR is proposed. Finally, some examples are provided to show the effectiveness of the new method and to compare it with previous studies.

1. Introduction

In decision making problems, preference relations are often constructed, which represent the decision maker's evaluation information provided by comparing each pair of alternatives.

It can be pointed out that due to the complexity and uncertainty of the socio-economic environment, fuzzy sets are insufficient to handle more complex situations. For example, traditional fuzzy sets cannot represent the hesitation of DMs. The hesitant fuzzy set, first proposed by Torra [1], can be used as an effective means for experts to deal with situations where experts hesitate about several values to define the membership of an element in a quantitative environment. It allows the membership of an element to have several values between 0 and 1.

To facilitate the application, Xia and Xu [2] proposed hesitant fuzzy elements (HFEs), and combined HFEs and preference relations to propose hesitant fuzzy preference relation (HFPR) and develop a decision making method with HFPR.

Since HFPR allows the decision maker to use only the real values of the interval [0, 1], this type of preference relations is limited in expressing and applying the decision maker's uncertainty. To solve this problem, Chen et al. [3] proposed interval-valued hesitant fuzzy sets (IVHFS) that allow DMs to use intervals in [0, 1] rather than real values.

Taking advantage of IVHFS, many interval-valued fuzzy decision making methods have been developed. For convenience of judgment, Chen et al.[9] proposed the concept of interval-valued hesitant fuzzy element (IVHFE) and then proposed interval-valued hesitant fuzzy preference relation (IVHFPR). Tang and Meng [4] extended the additive consistency concept for interval fuzzy preference relations (IFPRs) to IVHFPRs to provide additive consistency concept for IVHFPRs and proposed a group decision making (GDM) method with IVHFPRs based on additive consistency and consensus analysis. Zhai et al. [5] proposed the standard multiplicative consistency concept for IVHFPRs, which has the limitation of adding several intervals to IVHFEs with shorter length.

Zhang et al. [6] also discussed multiplicative consistency of IVHFPR based on the multiplicative consistency concept for interval FPR, which overcame the problems in the concept of Zhai et al. [5].

Tang et al. [7] introduced a more flexible multiplicative consistency concept for IVHFPR than the previous concepts and proposed a new group decision making algorithm with IVHFPR based on a formula for determining the weights of DMs and a formula for measuring the consensus level.

Considering previous studies on decision making using IVHFPR, it is possible to see that there are still several limitations.

(1) In decision making methods with IVDHFPR and IVHFPR, large-scale optimization problems must be solved.

(2) There is a lack of consideration of the consensus degree in group decision making.

To solve this problem, this paper investigates the decision making problem with IVHFPR. To do this, we first establish a method to construct a reference multiplicative consistency interval MPR corresponding to an interval MPR. Based on this, we establish a method to construct the reference multiplicative consistency preference relations corresponding to interval FPR. And for IVHFPR we propose to find IVIF priority weights using the reference multiplicative consistency preference relation.

2. Some basic concepts

Let $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$ be a finite set of alternatives.

Definition 2.1[8].Let $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ be an object set. If the elements of $\tilde{H} = (\tilde{h}_{ij})_{n\times n}$ are interval-valued hesitant fuzzy elements and satisfy the condition $h^-_{s,ij} + h^+_{m_{ji}+1-s,\,ji} = h^+_{s,ij} + h^-_{m_{ji}+1-s,\,ji} = 1, s = 1,2,\ldots, m_{ij}$, $h^-_{l,ij} = h^+_{l,ij} = 0.5, i, j = 1,2,\ldots,n$, we call $\tilde{H} = (\tilde{h}_{ij})_{n\times n}$ interval-valued hesitant fuzzy preference relation (IVHFPR), where $\tilde{h}_{ij}$ is the set of possible interval-valued dominance degrees of an object x_i over an object x_j, and m_{ij} is the number of elements of $\tilde{h}_{ij}$.

Definition 2.2. Let us assume that the consistency concept in a sense has been defined for the preference relation (interval multiplicative preference relation, interval fuzzy preference relation). And, let us assume that there is an analytic way to construct a consistent preference relation $\tilde{\tilde{R}}' = (\tilde{\tilde{r}}'_{ij})_{n\times n}$ corresponding to $\tilde{\tilde{R}} = (\tilde{\tilde{r}}_{ij})_{n\times n}$, and if $\tilde{\tilde{R}} = (\tilde{\tilde{r}}_{ij})_{n\times n}$ is consistent, then $\tilde{\tilde{R}} = \tilde{\tilde{R}}'$. Then the corresponding consistency preference relation $\tilde{\tilde{R}}' = (\tilde{\tilde{r}}'_{ij})_{n\times n}$ for a given $\tilde{\tilde{R}} = (\tilde{\tilde{r}}_{ij})_{n\times n}$ is called the consistency reference preference relation.

3. Reference multiplicative consistent interval FPR corresponding to interval FPR

3.1 Constructing method of reference multiplicative consistent interval MPR relation corresponding to interval MPR

Based on the consistency definition of the triangular multiplicative preference relation introduced in Wang [9], we consider the following consistency definition.

Definition 3.1. Let us assume that an interval multiplicative preference relation $\bar{A} = (\bar{a}_{ij})_{n\times n}$ is given. If $\bar{A}$ satisfies the following multiplicative transitivity, i.e., $\bar{a}_{ij}\bar{a}_{jk}\bar{a}_{ki} = \bar{a}_{ik}\bar{a}_{kj}\bar{a}_{ji}$ for all $i, j, k = 1,2,\ldots,n.$, $\bar{A}$ is called the consistency interval MPR.

Put it as follows.

$$e_{ij}^{-}=\prod_{s=1}^{n}\left(\frac{a_{is}^{-}a_{sj}^{-}}{a_{js}^{-}a_{si}^{-}}\right)^{\frac{1}{2n}}\sqrt{a_{ij}^{-}a_{ji}^{-}},\quad e_{ij}^{+}=\prod_{s=1}^{n}\left(\frac{a_{is}^{+}a_{sj}^{+}}{a_{js}^{+}a_{si}^{+}}\right)^{\frac{1}{2n}}\sqrt{a_{ij}^{+}a_{ji}^{+}},$$

$$\overline{E}=(\overline{e}_{ij})_{n\times n}=([e_{ij}^{-},e_{ij}^{+}])_{n\times n} \tag{1}$$

Then we have $0\le e_{ij}^{-}\le e_{ij}^{+}$.

Theorem 3.1. The matrix $\overline{E}$ constructed by Eq. (1) is the consistency interval MPR. The proof can be done using Definition 3.1 and Eq. (1).

Theorem 3.2. For $\overline{A}=(\overline{a}_{ij})_{n\times n}$ to be a consistency relation, it is necessary and sufficient that $\overline{A}=\overline{E}$ holds.

Proof. Let $\overline{A}=(\overline{a}_{ij})_{n\times n}$ $\overline{A}=(\overline{a}_{ij})_{n\times n}$ be a consistent relation. Then we have $\overline{a}_{ij}\overline{a}_{jk}\overline{a}_{ki}=\overline{a}_{ik}\overline{a}_{kj}\overline{a}_{ji}$, $i,j,k=1,2,\ldots,n.\Leftrightarrow a_{ij}^{-}a_{jk}^{-}a_{ki}^{-}=a_{ik}^{-}a_{kj}^{-}a_{ji}^{-},\ a_{ij}^{+}a_{jk}^{+}a_{ki}^{+}=a_{ik}^{+}a_{kj}^{+}a_{ji}^{+}\ ,i,j,k=1,2,\ldots,n.$

Hence, we have

$$\frac{a_{ij}^{-}}{a_{ji}^{-}}=\prod_{s=1}^{n}\left(\frac{a_{is}^{-}a_{sk}^{-}}{a_{ks}^{-}a_{si}^{-}}\right)^{\frac{1}{n}},\quad \frac{a_{ij}^{+}}{a_{ji}^{+}}=\prod_{s=1}^{n}\left(\frac{a_{is}^{+}a_{sk}^{+}}{a_{ks}^{+}a_{si}^{+}}\right)^{\frac{1}{n}}.$$

Using this expression, we have

$$e_{ij}^{-}=\prod_{s=1}^{n}\left(\frac{a_{is}^{-}a_{sj}^{-}}{a_{js}^{-}a_{si}^{-}}\right)^{\frac{1}{2n}}\sqrt{a_{ij}^{-}a_{ji}^{-}}=\sqrt{\frac{a_{ij}^{-}}{a_{ji}^{-}}}\sqrt{a_{ij}^{-}a_{ji}^{-}}=a_{ij}^{-}$$

$$e_{ij}^{+}=\prod_{s=1}^{n}\left(\frac{a_{is}^{+}a_{sj}^{+}}{a_{js}^{+}a_{si}^{+}}\right)^{\frac{1}{2n}}\sqrt{a_{ij}^{+}a_{ji}^{+}}=\sqrt{\frac{a_{ij}^{+}}{a_{ji}^{+}}}\sqrt{a_{ij}^{+}a_{ji}^{+}}=a_{ij}^{+}.$$

Hence $\overline{A}=\overline{E}$.

Now suppose that $\overline{A}=\overline{E}$ holds. Then from Theorem 3.1, it follows that $\overline{E}$ is a consistent relation (The proof is completed).

3.2. Constructing method of reference multiplicative consistent interval FPR corresponding to interval fuzzy preference relation

Definition 3.2 [10]. Let $\overline{R}=(\overline{r}_{ij})_{n\times n}$ be an interval FPR. If

$\frac{\overline{r}_{ij}}{\overline{r}_{ji}}\frac{\overline{r}_{jk}}{\overline{r}_{kj}}\frac{\overline{r}_{ki}}{\overline{r}_{ik}}=\frac{\overline{r}_{ik}}{\overline{r}_{ki}}\frac{\overline{r}_{kj}}{\overline{r}_{jk}}\frac{\overline{r}_{ji}}{\overline{r}_{ij}}$, $i,j,k=1,2,\ldots,n.$ $\overline{R}=(\overline{r}_{ij})_{n\times n}$ is called multiplicative consistent interval FPR.

Let us set $\overline{a}_{ij}=\overline{\mu}_{ij}/\overline{v}_{ij}$, $i,j=1,2,\ldots,n$ and $\overline{A}=(\overline{a}_{ij})_{n\times n}$. Then $\overline{A}=(\overline{a}_{ij})_{n\times n}$ is the interval MPR. Now, by Eq. (1), we can construct a consistent interval MPR $\overline{E}=(\overline{e}_{ij})_{n\times n}=([e_{ij}^{-},e_{ij}^{+}])_{n\times n}$, where $e_{ij}^{-}=\prod_{s=1}^{n}\left(\frac{a_{is}^{-}a_{sj}^{-}}{a_{js}^{-}a_{si}^{-}}\right)^{\frac{1}{2n}}\sqrt{a_{ij}^{-}a_{ji}^{-}}$ and $e_{ij}^{+}=\prod_{s=1}^{n}\left(\frac{a_{is}^{+}a_{sj}^{+}}{a_{js}^{+}a_{si}^{+}}\right)^{\frac{1}{2n}}\sqrt{a_{ij}^{+}a_{ji}^{+}}$.

Now we find $\overline{r}_{ij}'$ such that $\overline{r}_{ij}'/\overline{r}_{ji}'=\overline{e}_{ij}$, $i,j=1,2,\ldots,n$ by adding some conditions.

Now let us find $\overline{r}_{ij}'$ such that $r_{ij}'^{-}/r_{ji}'^{+}=e_{ij}^{-}$, $r_{ij}'^{+}/r_{ji}'^{-}=e_{ij}^{+}$, $r_{ij}'^{-}+r_{ji}'^{+}=1$.

Solving this expression, we obtain

$$r_{ij}'^{-}=\frac{\frac{\prod_{s=1}^{n}(r_{is}^{-}r_{sj}^{-}r_{sj}^{+}r_{is}^{+})^{\frac{1}{2n}}}{\prod_{s=1}^{n}(r_{js}^{-}r_{si}^{-}r_{si}^{+}r_{js}^{+})^{\frac{1}{2n}}}\sqrt{\frac{r_{ij}^{-}r_{ji}^{-}}{r_{ij}^{+}r_{ji}^{+}}}}{1+\frac{\prod_{s=1}^{n}(r_{is}^{-}r_{sj}^{-}r_{sj}^{+}r_{is}^{+})^{\frac{1}{2n}}}{\prod_{s=1}^{n}(r_{js}^{-}r_{si}^{-}r_{si}^{+}r_{js}^{+})^{\frac{1}{2n}}}\sqrt{\frac{r_{ij}^{-}r_{ji}^{-}}{r_{ij}^{+}r_{ji}^{+}}}} \qquad r_{ij}'^{+}=\frac{\frac{\prod_{s=1}^{n}(r_{is}^{+}r_{sj}^{+}r_{sj}^{-}r_{is}^{-})^{\frac{1}{2n}}}{\prod_{s=1}^{n}(r_{js}^{+}r_{si}^{+}r_{si}^{-}r_{js}^{-})^{\frac{1}{2n}}}\sqrt{\frac{r_{ij}^{+}r_{ji}^{+}}{r_{ij}^{-}r_{ji}^{-}}}}{1+\frac{\prod_{s=1}^{n}(r_{is}^{+}r_{sj}^{+}r_{sj}^{-}r_{is}^{-})^{\frac{1}{2n}}}{\prod_{s=1}^{n}(r_{js}^{+}r_{si}^{+}r_{si}^{-}r_{js}^{-})^{\frac{1}{2n}}}\sqrt{\frac{r_{ij}^{+}r_{ji}^{+}}{r_{ij}^{-}r_{ji}^{-}}}} \tag{2}$$

Based on this, we construct the matrix $\overline{R}'=(\overline{r}_{ij}')_{n\times n}=([r_{ij}'^{-},r_{ij}'^{+}])_{n\times n}$.

Theorem 3.3.The constructed $\overline{R}'=(\overline{r}_{ij}')_{n\times n}$ is a consistent interval FPR. And if $\overline{R}'$ is a multiplicative consistent interval FPR, then $\overline{R}=\overline{R}'$.

The proof can be done similarly to Theorem 3.2.

4. A method to determine priority weights based on reference consistency preference relation in interval-valued hesitant fuzzy preference relation

Let $\overline{P}=(\overline{p}_{ij})_{n\times n}$ be an IVHFPR, where $\overline{p}_{ij}=\{\overline{p}_{ij}^{1},\overline{p}_{ij}^{2},\ldots,\overline{p}_{ij}^{l_{ij}}\}$. From $\overline{P}=(\overline{p}_{ij})_{n\times n}$, we construct all possible m interval FPRs, where $m_i=\prod_{i<j}l_{ij}$.

Let $\Omega_{\overline{p}}=\{\overline{B}^{1},\overline{B}^{2},\ldots,\overline{B}^{m}\}$ be the set of m interval FPRs, where $\overline{B}^{l}=(\overline{b}_{ij}^{l})_{n\times n}$, $\overline{b}_{ij}^{l}\in\overline{p}_{ij}$.

Now, for $\overline{B}^{l}=(\overline{b}_{ij}^{l})_{n\times n}$, we construct the consistent interval FPR $\overline{C}^{l}=(\overline{c}_{ij}^{l})_{n\times n}=([c_{ij}^{l-},c_{ij}^{l+}])_{n\times n}$ by Eq. (2).

Calculate the interval weight $\overline{w}_i^{l}=[w_i^{l-},w_i^{l+}],i=1,2,\ldots,n$ where $\overline{w}_i^{l}=\prod_{j=1}^{n}(\overline{c}_{ij}^{l})^{1/n}=\prod_{j=1}^{n}([c_{ij}^{l-},c_{ij}^{l+}])^{1/n}$, $i=1,2,\ldots,n$.

By averaging the values of $\overline{w}_i^{l}=[w_i^{l-},w_i^{l+}]$, $l=1,2,\ldots,m$, the interval weights of the alternatives are determined as follows: $\overline{w}_i=\prod_{s=1}^{m}(\overline{w}_i^{s})^{1/m}=\prod_{s=1}^{m}([w_i^{s-},w_i^{s+}])^{1/m}$, $i=1,2,\ldots,n$. The final order of the alternatives is determined by ordering the interval weights $\overline{w}_i$, $i=1,2,\ldots,n$

Tang et al.'s method [7] has to solve 0-1 nonlinear mixed programming problems to judge the additive consistency of IVIFPR. In the case of large number of alternatives and large m_{ij}, a large number of 0-1 nonlinear mixed programming problems must be solved. This is a computationally expensive problem.

However, the proposed method in this paper only solves a small number of smaller-scale 0-1 linear mixed programming problems compared to Tang et al. [10].

5. Conclusion

We first have found an analytical expression for constructing the consistent interval MPR corresponding to the interval MPR, and then have used it to construct an analytical expression for constructing the multiplicative consistent and additive consistent interval FPR. Based on this, we have considered how to find the priority weights of alternatives using reference consistency preference relations from interval-valued hesitant fuzzy preference relations.

The major contributions of this paper are as follows:

(1) Based on the reference multiplicative consistency interval MPR, we establish a method to construct the reference multiplicative consistency preference relations

corresponding to interval FPR.

(2) For IVHFPR, we propose a method to find IVF priority weights using the reference multiplicative consistency preference relations, and a new group decision making algorithm with IVHFPR is proposed.

Acknowledgements

The author would like to thank the organizing committee for its significant and meaningful role in the workshop.

1. Torra V., 2010. Hesitant fuzzy sets, Int. J. Intell. Syst, 25(6), 529-539.
2. Xia M. M., Xu Z. S., 2011. Hesitant fuzzy information aggregation in decision making. Int J Approx Reason, 52, 395–407.
3. Chen N., Xu Z. S., Xia M. M., 2013. Correlation coefficients of hesitant fuzzy sets and their applications to clustering analysis. Apple Math Model, 37, 2197–2211.
4. Tang J., Meng F. Y., 2018. Ranking objects from group decision making with interval-valued hesitant fuzzy preference relations in view of additive consistency and consensus. Knowl-Based Syst, 162, 46–61.
5. Zhai YL, Xu ZS, Liao HC., 2019. The stably multiplicative consistency of fuzzy preference relation and interval-valued hesitant fuzzy preference relation. IEEE Access, 7, 54929–54945.
6. Zhang Y. N., Tang J., Meng F. Y,. 2019. Programming model-based method for ranking objects from group decision making with interval-valued hesitant fuzzy preference relations. Appl Intell, 49, 837–857.
7. Tang J., Meng F. Y., 2020. New method for interval-valued hesitant fuzzy decision making based on preference relations, Soft Computing, https://doi.org/10.1007/s00500-020-04756-4.
8. Chen N., Xu Z. S., Xia M. M., 2013. Interval-valued hesitant preference relation relations and their applications to group decision making, Knowledge-Based Systems, 37, 528–540.
9. Wang Z. J., 2015. Consistency analysis and priority derivation of triangular fuzzy preference relations based on modal value and geometric mean, Information Sciences, 314, 169-183.
10. Wang Z. J., Kevin W. Li., 2012. Goal programming approaches to deriving interval weights based on interval fuzzy preference relations, Information Sciences, 193, 180–198.

СРАВНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ И РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ФАЙЛОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА NDVI

Ю. В. Авраменко, Р. К. Фёдоров
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
avramenko@icc.ru

Современные решения мониторинга методами дистанционного зондирования Земли характеризуются обработкой объемов информации, относящихся к классу Big Data. Для эффективного хранения и управления данными требуется обеспечить высокую пропускную способность. Локальные файловые системы становятся «узким местом» при параллельной обработке данных несколькими вычислительными узлами. Проблема заключается в ограниченной пропускной способности и отсутствии встроенных механизмов для распределенного доступа, что приводит к значительным задержкам при чтении больших наборов данных. Альтернативный подход заключается в применении распределенной файловой системы [1], которая обеспечивает масштабирование и параллельный доступ.

В рамках текущих исследований был выполнен сравнительный анализ производительности двух файловых систем с целью определения стратегии развития геопортала ИДСТУ СО РАН. Анализ был основан на результатах вычислительных экспериментов по расчету индекса NDVI. Расчет включал в себя чтение, обработку и запись данных. Управление осуществлялось при помощи библиотеки распределенных вычислений Dask. Dask кластер состоял из одного управляющего и семи вычислительных узлов. Исходные данные – снимки Sentinel-2, разделенные на два массива размером 172 и 3021. Данные были размещены в двух локальных файловых системах (дисковая и твердотельная) и одной распределенной (твердотельная). Результаты сравнения производительности можно увидеть в таблице ниже.

Таблица 1 – Сравнение производительности файловых систем

Файловая система	Время обработки (минут)	
	172 снимка	3021 снимок
Распределенная	2.48	25.16
Локальная твердотельная	1.7	26.75
Локальная дисковая	35.8	200

Полученные результаты показали необходимость проведения дополнительных тестов. Идея теста заключалась в проверке чтения и записи файлов разного размера и количества. Дополнительное тестирование выявило, что при оперативной обработке данных малого размера (~500 Мб) выигрывает локальная файловая система с твердотельным накопителем, но если необходимо обрабатывать файлы большого размера (>1 Гб) и по множеству раз, например, при тестировании алгоритмов, где важна скорость чтения, то тогда распределенная файловая система представляется более перспективной.

1. X. Pan, Z. Luo, L. Zhou. Navigating the Landscape of Distributed File Systems: Architectures, Implementations, and Considerations. (2024),doi.org/10.48550/arxiv.2403.15701.

ЧИСЛЕННЫЕ СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПОЛЕЙ БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ НА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ*

М. С. Акентьева, Н. А. Каргаполова
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
nkargapolova@sscc.ru

В условиях изменяющегося климата возрастает актуальность исследования биоклиматических условий на той или иной территории и их влияния на самочувствие и здоровье человека. Для описания воздействия на человека комплекса метеорологических показателей используют различные биоклиматические индексы. В докладе будут представлены результаты численного стохастического моделирования и исследования пространственно-временных полей трёх биоклиматических индексов: универсального индекса теплового комфорта (UTCI) [1], индекса холодового стресса [2] и эквивалентно-эффективной температуры [3]. Будет приведено описание двух подходов к стохастическому моделированию вышеуказанных полей, а именно, подхода на основе специально разработанного стохастического «генератора погоды» и на основе определяющих формул. Первый подход основан на том, что биоклиматические индексы – суть функции нескольких метеорологических параметров. В связи с этим представляется естественным сначала смоделировать совместные случайные поля метеорологических параметров (т.е. воспользоваться стохастическим “генератором погоды”), а затем по полученным модельным траекториям вычислить модельные значения биоклиматического индекса. В рамках второго подхода для каждого биоклиматического индекса строится своя стохастическая модель, при реализации которой моделируются только значения этого индекса (в качестве промежуточного шага моделирование метеопараметров не проводится).

Будут представлены результаты численных экспериментов по оценке различных статистических характеристик полей биоклиматических индексов на сети метеостанций, расположенных на Байкальской природной территории и в прилегающих к ней районах. В частности, будут приведены оценки вероятности попадания UTCI в интервалы комфортности [4] в течение заданного времени.

Кроме этого, будут обсуждаться вопросы, касающиеся трудоёмкости численной реализации предложенных моделей, требуемых затрат машинной памяти и возможности построения условных стохастических моделей для сценарного моделирования рассматриваемых полей.

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Минобрнауки России на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

1. Blazejczyk K., Brode P., Fiala D., Havenith G., Holmer I., Jendritzky G., Kampmann B., Kunert A. Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale // Miscellanea Geographica. 2010, V. 14. P. 91–102.
2. Mekis É., Vincent L.A., Shephard M.W., Zhang X. Observed Trends in Severe Weather Conditions Based on Humidex, Wind Chill, and Heavy Rainfall Events in Canada for 1953–2012 // Atmos Ocean. 2015. V. 53. P. 383–397.
3. Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики / Под ред. Кобышевой Н.В. СПб.: Астерион, 2008.
4. Виноградова В.В. Универсальный индекс теплового комфорта на территории России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 2. С. 3–19.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОДЛИННЫХ ТАБЛИЦ ИЗ HTML-ДОКУМЕНТОВ

М. С. Алакшин[1], В. В. Парамонов[1,2]
[1]Иркутский государственный университет
[2] Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
marks473a@yandex.ru, slv@icc.ru

Современный веб насчитывает огромное количество ценной информации, представленной в таблицах в формате HTML. Данный формат удобен для понимания наборов данных человеком, но фактически является полуструктурированным, что затрудняет автоматизированную обработку. В HTML-таблицах зачастую представлены различные статистические, финансовые отчеты, данные мониторингов, являющиеся ценным источником данных для различного рода исследований. Однако для этого требуется извлечение таблиц и трансформация в структурированный вид. В одной из первых работ [1], посвященных извлечению таблиц из HTML, утверждается, что всё множество таблиц, представленных в HTML, делится на два класса: подлинные и неподлинные. Подлинные таблицы содержат полуструктурированные данные, приводимые к реляционному виду. Неподлинные используются для верстки. Данная работа посвящена решению задачи идентификации и извлечения подлинных таблиц.

Подлинные таблицы, в свою очередь могут иметь различные принципы организации данных. При этом на текущий момент какая-либо единая таксономия типов таблиц отсутствует [2]. В работе подлинные таблицы рассматриваются исходя из таксономии, предложенной Е. Крестаном и П. Пантелем [3, 4]. Однако мы допускаем, что в рамках предложенной таксономии все виды подлинных таблиц могут иметь заголовки иерархической структуры. Для иерархической структуры требуется соблюдение инварианта – ширина каждой ячейки потомка в иерархии не должна превышать ширину её непосредственной ячейки-предка, а также отсутствие пространственных наложений ячеек. Плоский же заголовок представляет собой частный случай иерархической структуры с уровнем иерархии ноль.

Для определения подлинности таблиц разработан эвристический алгоритм, который анализирует все таблицы (объекты <table/>) в HTML-документе и делает заключение об их подлинности или неподлинности. В основе алгоритма лежит представление таблицы в виде двухмерного зубчатого массива, каждый элемент которого содержит данные о ячейке (ширина, высота, содержимое). В качестве базового типа рассматривается таблица типа «вертикальный список». Итерируясь сверху вниз, слева направо можно проверить правильность компоновки таблицы с шапкой вверху. Остальные таблицы приводятся к таблицам с шапкой вверху с помощью транспонирования и отражения относительно вертикали. Соответствие данных в таблице достигается за счёт проверки каждого типа данных в ячейки данных одной ветки иерархии. Тип данных может быть: натуральное число; число с плавающей точкой; дата; время; деньги; проценты; строка. Они определяются на основе анализа содержимого ячейки посредством применения шаблонов регулярных выражений. Следует отметить, что проверка связности данных в зависимости от принципа их организации (например, вертикальные, горизонтальные списки, таблицы атрибут/значение) на данном этапе не производится.

На основе разработанного алгоритма создан прототип инструментального программного средства (ПС), для извлечения подлинных таблиц из корректных* HTML – документов. Разработанное ПС выполняет автоматическое обнаружение подлинных таблиц и экспортирует их в файлы формата Excel (*.xlsx) или JSON. Есть возможность обрабатывать как отдельные HTML-файлы, так и веб-ресурсы с заданной глубиной. ПС обеспечивает подготовку данных для их последующего анализа и интерпретации.

1. Wang, Y. and Hu, J., 2002, August. Detecting tables in html documents. In International Workshop on Document Analysis Systems (pp. 249-260). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
2. Kostyleva O. et al. Towards Comparison of Table Type Taxonomies //2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO). – IEEE, 2022. – С. 1461-1465.
3. Crestan E., Pantel P. A fine-grained taxonomy of tables on the Web // Proceedings of the 19th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. 2010. С. 1405–1408.
4. Crestan E., Pantel P. Web-scale table census and classification // Proceedings of the Fourth ACM International Conference on Web Search and Data Mining. 2011. С. 545–554.

* https://validator.w3.org

ИССЛЕДОВАНИЕ О РАЦИОНАЛЬНОМ ПЛАНЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДАТЧИКА ПОРТАТИВНОГО МОНИТОРА ^{131}I В ВОЗДУХЕ

Ан С. Х., Ан С. С., Ли Х. В., Чон Г. С.
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
jgs8971@star-co.net.kp

Мы представляем план устройства датчика портативного монитора типа ^{131}I в атмосфере и рассчитали геометрическую эффективность детектора по размерам активного угольной банки через симуляцию MCNP. Кроме того, для увеличения количества абсорбции ^{131}I в активированном угле рационально решил, скорость потока воздуха. Мы рассчитали эффективность абсорбции активированного углерода и установили метод расчета уровня загрязнения в атмосфере ^{131}I.

1. Введение

Измерение ^{131}I в атмосфере имеет большое значение для защиты жизни населения, поскольку его содержание ^{131}I в нормальном состоянии атмосферы очень мало, но в случае увеличения концентрации в любом случае окружающая среда сильно загрязнена [1-4].

Образец воздуха, содержащий ^{131}I, был передан активированным углем в течение определенного времени, а затем измерено излучение абсорбированного ^{131}I [3,4]. Это принцип монитора типа ^{131}I в воздухе, который может оценить концентрацию излучательной способности ^{131}I в воздухе на основе скорости потока воздуха и времени.

2. Конфигурация портативного монитора ^{131}I в воздухе

Монитор ^{131}I в атмосфере в значительной степени состоит из датчика, схемы обработки сигналов и дисплея LCD-дисплея.

2.1. Датчик

Датчик состоит из большого воздушного насоса, активированного угля, воздушного фильтра, сцинтиллятора и свинцового экрана.

Для повышения геометрической эффективности датчика активированная камера была сделана кольцевидным корпусом, а сцинтиллятор NaI(Tl) и активированный уголь соединён как на рисунке 1 (слева от рисунка.1).



Рисунок 1. Расположение активированного угля и сцинтилляторов

Используя MCNP, геометрические эффективности по внутренней и высотой толщины активированного угля были одинаковыми, что и в уравнении 1.

$$\eta = (2.95x^2 + 2.06x + 1.2)(-0.17y^2 + 1.25y - 0.69)e^{0.03z^3 - 0.28z^2 + 0.27z - 5.91} \quad (1)$$

η: Геометрическая эффективность детектора (%), x: внутренний диаметр кольцевидного активированного угольного корпуса (cm), *y*: высота кольцевой активированной угольной банки (cm), *z*: толщина кольцевидного активированного угля (cm).

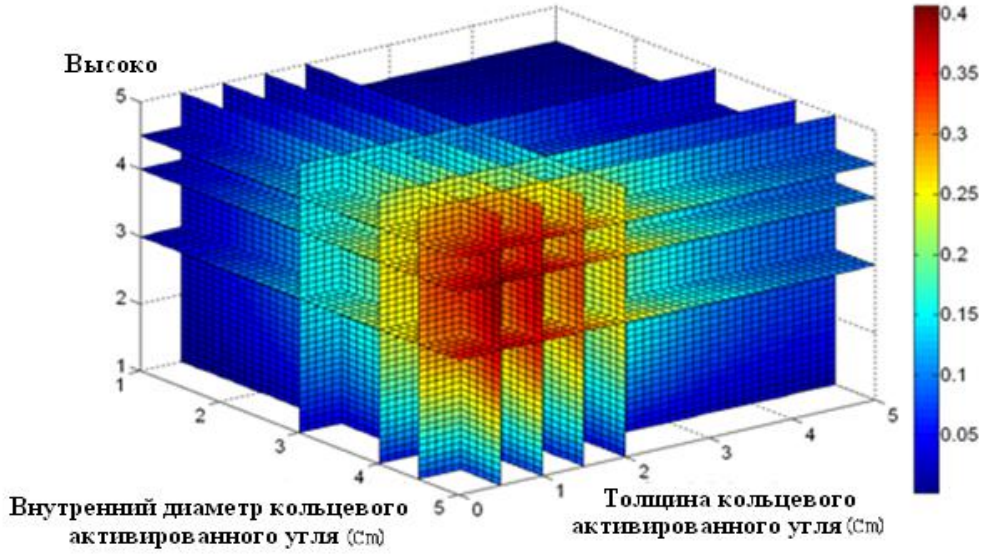


Рисунок 2. Геометрическая эффективность по внутреннему диаметру, высоте и толщине корпуса активированного угля

На рисунке 2 показано при обеспечении активированной угольной банки составляет 4-5 cm, а толщина активированного угольного корпуса составляет менее 1 cm, что приводит к более высокой геометрической эффективности

Сцинтилляторы были выбраны для вспышки NaI(Tl) размером Φ25mm×h35mm. Таким образом, размер активированного угля был выбран толщиной 7 mm, учитывая результаты моделирования (справа от рисунка 1).

2.2. Коэффициент абсорбции

Эксперимент проводил количественную оценку портативного монитора ^{131}I (PAIM: portable airborne ^{131}I monitor) в воздухе с использованием Na^{131}I. На верхней поверхности стакана есть две входные и выходные трубы, соединенные с входом в воздушный насос, а выход насоса соединен с прибором 60 L. В качестве входа в стакан поместили 1 мл водного раствора ^{131}I и нагревали. В стакане раствор ^{131}I испаряет тепло.

Испарённый йодный газ смешивается с обычным воздухом, входящим в вход в стакан насосом и остается в приборе. Полученный таким образом образец воздуха использовался для изучения характеристик PAIM. Образцы воздуха измеряли восемь раз, изменяя поток потока от 0.1 ~ 1.4 L /min.

Для каждого измерения образцы воздуха были переданы в течение 3 минут, а линия йодного газа, абсорбированного на активированном угле, что было записано в течение γ 1 минуты. Необработанная мощность ^{131}I водного раствора составляла 120Bq/mL, а активированный уголь был протестирован путем замены нового каждый раз.

Эффективность абсорбции активированного углерода была рассчитана с использованием активных угольных банков, расположенных в прямом порядке. Воздушный образец, содержащий ^{131}I, проходил через активированные углеродные банки при постоянной скорости. При этом эффективность абсорбции ω может быть рассчитана так, как описано ниже.

$$\omega = \frac{S_{p1}}{S_{p1}+S_{p2}} \quad (2)$$

Здесь S_{p1} и S_{p2} имеют широкополосные области пика (Рассмотрим фон), которые были рассмотрены в диапазоне 364.4keV, абсорбированных на первой и второй банках активированного угля.

2.3 Вычислительный метод оценки концентрации излучательной способности

Для каждого эксперимента концентрация излучательной способности ^{131}I была рассчитана следующим образом.

$$C = \frac{A}{\omega V}\ , \qquad A = \frac{S_P}{t_d}\frac{1}{\rho\eta\varepsilon} \quad (3)$$

Здесь A - это излучение ^{131}I, абсорбированное на активированном угле, V –это объём, который проходит через активный углерод, t_d – это время записи детектора, η – это эффективность детектора, ρ – это эффективность записи многоканального анализатора и скорость высвобождения на единицу линии с энергией 364,4 keV (0.8116).

S_p – это площадь определённого фотоэлектрического пика (Рассмотрим фон), который был принят для 364,4 кэВ.

Здесь $$V = v \cdot t_p \quad (4)$$

Поэтому $$C = \frac{A}{\omega V} = \frac{S_P}{\omega\cdot\rho\cdot\eta\cdot\varepsilon\cdot v\cdot t_p\cdot t_d} \quad (5)$$

$$K = \frac{1}{\omega\rho\eta\varepsilon} \quad (6)$$

$$C = K \cdot \frac{S_P}{v\cdot t_p\cdot t_d} \quad (7)$$

В указанном уравнении v – это поток воздуха, а t_p – это время работы насоса.

Здесь время измерения относительно коротко по сравнению с периодом полувыведения ^{131}I (8.04d), и не было рассмотрено влияние затухания ^{131}I, которое происходит во время работы детектора.

3. Результаты и анализ

Рассчитывая результаты моделирования MCNP, размер оболочки активированной угольной банки был разработан так: внутренний диаметр 25 mm, высота – 35 mm и толщина – 7 mm. Таким образом, вычислив эффективность обнаружения по уравнению 1, η = 11.5%.

При скорости воздуха 0,9 L/min скорость абсорбции была самой высокой. При этом значение s_p в первой активированной углевой банке составляло 76.3, но на второй - 1.9. Таким образом, абсорбционная скорость может быть получена уравнением 2. ω ≈0.98%.

Затем рассчитывали концентрации облучения воздушного образца в приборе. Как видно в уравнении 6, K можно считать внутренней константой датчика. Таким образом, концентрация излучательной способности в атмосфере определяется в соответствии с площадью фотоэлектрического пика S_p, скоростью воздуха, временем работы насоса и площадью записи детектора для 364,4keV. Используя уравнение 7, концентрация излучательной способности воздуха в приборе 60 L равна $(5.0\pm0.1)\times10^{-3}$Bq/cm^3. Эксперименты несколько раз, уменьшая количество экспериментов в водном растворе ^{131}I, минимальный предел обнаружения составлял 2.1×10^{-3} Bq/cm^3 при расчете в течение 1min.

4. Заключение

Мы предложили рациональный план дизайна для развития PAIM и рационально установили геометрические размеры активированного угля через

симуляцию MCNP. Соответствующая скорость потока воздуха для повышения эффективности абсорбции составляла 0,9 L/min, а эффективность абсорбции в активированном угле составляла около 98%. Минимальный предел обнаружения спама в одну минуту составляет 2.1×10^{-3} Bq/cm^3. Для получения меньшего минимального предела обнаружения необходимо увеличить геометрическую эффективность детектора (ω) и удлинить время записи (t_d) как можно дольше. Кроме того, необходимо использовать большой объем воздуха и максимизировать удельную активность в активированном угле. Обычные портативные мониторы сильно влияют на фон, потому что они не имеют щита. Из такого фактора минимальный предел обнаружения становится больше. Мы представили план устройства датчика PAIM с более низким пределом обнаружения и одновременно недорогого и легкого типа.

1. Taghipour f., evans g. j. iodine behavior under conditions relating to nuclear reactor accidents // Nuclear technology. 2002. V. 137. P.181-193
2. Chino M., Nakayama H., Nagai H., Terada H., Katata G., Yamazawa H. Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere // Journal of Nuclear Science and Technology. 2012. V. 48. P. 1129–1134.
3. Zhao C., Tang F., He L., Xu Y., Lu X. Development of a calibration system for airborne ^{131}I monitoring devices // Applied Radiation and Isotopes. 2016. V. 109. P. 460–464.
4. Turner J., Robshaw T. J., Kearney S., Simoni M. Baidak A., Sharrad C. A., Walkley B. Ogden M. D. Radioiodine abatement – Development of radioiodine targeting strategies in the light of zero emission // Progress in Nuclear Energy. 2023. V. 165. P. 1-11.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LLM ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПАР «КЛЮЧ-ЗНАЧЕНИЕ» ИЗ ДОКУМЕНТОВ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА БАЗЕ QWEN3-VL

В. С. Андрющенко
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
vitya.andr.02@mail.ru

Извлечение информации из документов представляет собой фундаментальную задачу в области обработки естественного языка и компьютерного зрения. В контексте делопроизводства и аналитики, автоматическое распознавание и структурирование данных в формате "ключ-значение" (например, "Директор организации" → "Иванов И.И.") имеет высокую ценность. Однако этот процесс усложняется, когда данные представлены в виде изображений с разнообразными макетами, шрифтами и визуальными элементами. Развитие мультимодальных больших языковых моделей (LLM), способных анализировать визуальные и текстовые данные одновременно, открывает новые возможности для решения этой проблемы.

Для данного исследования была выбрана модель Qwen3-VL-30B-A3B-Instruct по нескольким ключевым причинам:

1. Мультимодальность: Модель специально разработана для обработки изображений и текста, что критически важно для задачи извлечения пар “ключ-значение” из документов.
2. Высокая производительность: Qwen3-VL демонстрирует конкурентоспособные результаты на мультимодальных бенчмарках, превосходя предыдущие версии Qwen и сопоставимые модели в понимании визуальной информации, пространственного восприятия и комплексного визуального анализа. Использование архитектуры Mixture-of-Experts (MoE) позволяет модели достигать высокой производительности при меньших вычислительных затратах по сравнению с “плотными” (Dense) моделями аналогичного размера, что делает ее более пригодной для практических экспериментов.

Исследование будет основано на экспериментах по дообучению модели Qwen3-VL-30B-A3B-Instruct. Цель — оценить влияние размера обучающей выборки на точность извлечения пар “ключ-значение”. Для этого будут использоваться три набора однотипных данных (счета на оплату):

1. (100 примеров): Полноценная выборка для стандартной тонкой настройки.
2. (50 примеров): Уменьшенная выборка для анализа эффективности обучения с ограниченным объемом данных.
3. (20 примеров): Минимальный набор данных для оценки способности модели к обучению «с малым числом примеров» (few-shot learning).

Каждый эксперимент будет включать следующие шаги:

1. Подготовка размеченных изображений документов с указанием пар "ключ-значение".
2. Обучение модели на каждом из трех наборов данных.
3. Проведение оценки производительности модели на тестовом наборе, который будет одинаковым для всех экспериментов. Метрики будут включать точность, полноту и F1-меру.

4. Сопоставление результатов, полученных при разных объемах обучающей выборки, для выявления оптимального соотношения между количеством данных и качеством модели.

Ожидается, что производительность модели будет пропорциональна объему обучающих данных, однако исследование покажет, насколько эффективно модель справляется с задачей извлечения пар “ключ-значение” даже при очень ограниченной выборке. Результаты позволят:

1. Определить минимальный объем данных, необходимый для достижения приемлемой точности в задаче извлечения пар “ключ-значение” с использованием Qwen3-VL.
2. Продемонстрировать адаптивность мультимодальных LLM к узкоспециализированным задачам, что особенно актуально для сфер с ограниченным доступом к размеченным данным.
3. Внести вклад в понимание поведения MoE-моделей при обучении на небольших датасетах.

Предлагаемое исследование предоставит ценные данные о применимости и эффективности мультимодальной LLM Qwen3-VL-30B-A3B-Instruct для решения задачи извлечения пар "ключ-значение" из документов. Анализ влияния размера обучающей выборки поможет оптимизировать процесс дообучения и предоставит практические рекомендации для внедрения LLM в системы автоматизированной обработки документов.

1. Chen Y., et al. A Question-Answering Approach to Key Value Pair Extraction from Documents // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2024.
2. Quantiphi. How Multimodal LLMs Elevate Key Information Extraction (KIE) // quantiphi. 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://quantiphi.com/blog/from-documents-to-insights-how-multimodal-llms-elevate-key-information-extraction-kie/ (дата обращения: 17.10.2025).

МЕТОДИКА ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА НА ОСНОВЕ АППРОКСИМАЦИИ ШЕПАРДА

А. С. Аникин[1], А. Ю. Горнов[1], Е. Т. Кузьменко[2], В. В. Кузьменко[3]
[1]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН,
[2]Иркутский диагностический центр, АО «Поликлинический комплекс»,
[3]ИГМАПО – филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО МЗ РФ
gornov@icc.ru

Под факторным анализом будем понимать задачу ранжирования воздействий, оцененных экспериментальным путем, направленную на выявление множества существенных факторов, определяющих выходные параметры явления, и отсечение несущественных. Информационной основой таких методик являются обязательные экспериментальные данные. Традиционно для решения задач такого типа используются методы многомерного статистического анализа – метод главных компонент, корреляционный анализ, регрессионный анализ и т.п. Использование в этих случаях популярных в настоящее время нейронных инструментов оказывается, по-видимому, не слишком успешным вследствие известной флексибильности, вносимой на этапе закладки избыточной их архитектуры, дающей возможности гарантировать аппроксимационные свойства. Многие исследователи считают, что успешное решение содержательных задач факторного анализа (сокращение объемов планируемого эксперимента) малореально без повторного привлечения экспертов на этапе ранжировки входных факторов, что приводит к методам либо дополнительных экспертных оценок, либо к методам повторного эксперимента (см., напр., [1, 2]).

Методики аппроксимации Шепарда в последние годы получили значительное развитие в направлении увеличения гибкости, обучаемости и смягчения их известных недостатков (см., напр., [3]), но при этом, как и следовало ожидать, приобрели не слишком конструктивные особенности, во многом схожие с особенностями нейронных моделей. Однако в исходном виде метода Шепарда (см., напр., [4]) строгая детерминированность аппроксимации с вытекающей четкостью моделей позволяет строить вычислительные методики, опирающиеся на многократные тонкие сравнения близких функциональных зависимостей.

В докладе обсуждается предложенная методика анализа данных, построенная на основе классического оператора Шепарда [3]. Имеющийся информационный массив – таблица (матрица) в общем случае – для получения адекватной основы моделирования – обучающей выборки – целесообразно подвергнуть двум операциям нормализации, связанным с удалением малоинформативных и/или зашумляющих компонентов – строк и столбцов. Удаление малополезных строк (прецедентов) будем называть «горизонтальной чисткой»: с применением оператора Шепарда строится общая модель, включающая все имеющиеся в информационной базе прецеденты. Затем, по одной из несложных процедур, выявляются и удаляются по одному наиболее отклоняющиеся от средних в некотором смысле значений прецеденты. Каждая такая процедура требует построения еще одной модели «по Шепарду»; ее количественное сравнение с общей моделью и дает основания для принятия решения об удалении части прецедентов.

Методика факторного анализа является способом «вертикальной чистки» исходного информационного массива. Как и в предыдущем случае, на первом этапе строится исходная модель «по Шепарду», опирающаяся на полный список столбцов (факторов). Затем, случайным образом, удаляется один из столбцов и снова стоится модель. Сравнение двух построенных на разных выборках моделей позволяет

принимать решение о полезности фактора и необходимости его дальнейшего пребывания в рассмотрении. Количественный критерий сравнения моделей может быть реализован различными способами; мы считаем целесообразным генерацию дополнительной сетки случайного характера; разница выходов двух моделей на этой сетке в евклидовой норме и выполняет роль невязки.

Возможен различный порядок использования процедур нормализации – сначала «горизонтальная чистка», а потом «вертикальная» или наоборот; мы использовали первый случай. Для проверки работоспособности предложенной методики нами был просмотрен ряд работ по анализу данных медицинского происхождения (см., напр., [5–8]). Во всех случаях полученные результаты были обсуждены с экспертами-медиками и получили содержательную трактовку. Наиболее интересным вариантом приложения методики нам показала работа [5]. Исходная информационная база содержала 31 показатель, которыми эксперты оценивали женскую фертильность. После многократного выполнения этапов удаления показателей (столбцов) было выявлено, что точность моделирования практически не меняется до тех пор, пока в рассмотрении не остается всего 5 факторов; затем точность конструируемых моделей резко падала. Обсуждение с экспертами привело к пониманию несостоятельности полученного остаточного списка, поскольку из него был удален фактор, известный всем специалистами как несомненно влиятельный. С учетом этой информации был составлен список неудаляемых факторов и вся процедура методики повторена сначала. После этой итерации был получен окончательный список из 5 существенных факторов [9]. Таким образом, полученный результат был подвергнут ответственной экспертизе и содержательной трактовке сообществом специалистов. Приводятся результаты вычислительных экспериментов

1. Spall J. C. Factorial Design for Efficient Experimentation: Generating Informative Data for System Identification // IEEE Control Systems Magazine. 2010, 30 (5): 38–53.
2. Григорьев Ю. Д. Методы оптимального планирования эксперимента: линейные модели: Учебное пособие // СПб, Издательство «Лань», 2015. 320 с.
3. Никифоров А.В., Горнов А.Ю. Методика овыпукления многоэкстремальной функции на основе модифицированного оператора Шепарда // Ляпуновские чтения, 2016, С.50.
4. Caira R., Dell'Accio F. Shepard-Bernoulli operators // Mathematics of computation. 2007. V. 76, № 257. Pp. 299–321.
5. Горнов А.Ю., Кузьменко Е.Т., Аникин А.С., Зароднюк Т.С. Применение алгоритмов аппроксимации экспериментальных данных в задаче выявления значимых медико-социальных факторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. Т. 20, № S4. С. 92–96.
6. Кузьменко В.В., Аникин А.С., Горнов А.Ю. Оценка точности математических моделей расчета концентраций фракций холестерина // Acta Biomedica Scientifica. 2010. №4 (74). С. 185–189.
7. Кузьменко В.В., Горнов А.Ю., Аникин А.С. Моделирование концентрации аполипопротеина А1 в крови с применением модифицированной технологии Шепарда // Материалы конф. "Ляпуновские чтения" (Иркутск, 7–11 декабря 2020 г.). 2020. С. 37.
8. Кузьменко В.В., Горнов А.Ю. Отработка практических подходов к установлению референтных интервалов на основе данных пациентов // Материалы конференции "Ляпуновские чтения" (Иркутск, 5-9 декабря 2022 г.). 2022. С. 84–85.
9. Кузьменко Е. Т. Клинико-эпидемиологические аспекты женского бесплодия (на примере Иркутской области) // дисс. кандидата медицинских наук: 14.00.01. Иркутск, 2008. 110 с.

ЭТАПЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ БЕЗУСЛОВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А. С. Аникин, А. Ю. Горнов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Основной задачей, лежащей в основе большинства оптимизационных подходов, по праву считается задача безусловной минимизации. Ее центральное место обусловлено широко распространенными и достаточно эффективными на практике методиками редукции более сложных экстремальных задач к более простым. С использованием безусловной минимизации небезуспешно решаются задачи математического программирования, оптимального управления, поиска стратегий в играх, многокритериальной оптимизации, идентификации систем, машинного обучения, искусственного интеллекта… Совет бывалых прикладников: «научись хорошо решать задачу поиска минимума функции и будет тебе счастье» – совсем не так уж и плох.

Однако задача безусловной минимизации «на проверку» оказывается совсем не такой уж простой, как это кажется на первый взгляд. И наличие множества красивых теоретических исследований и доступных программных инструментов для этой задачи не слишком облегчает участь исследователя, приступившего к ее использованию для своих целей. Прежде всего, следует заметить, что на практике формируются, вероятнее всего, не удобные для исследований выпуклые задачи, а задачи унимодальные или, что еще сложнее, многоэкстремальные. Оставив пока за пределами обсуждения проблемы поиска глобального экстремума, сконцентрируем внимание на унимодальных задачах – поиске локального экстремума невыпуклых функций. Инвентаризация всех возможных неприятностей (см., напр., [1]), обязательная для глубокого проникновения в суть проблемы, вряд ли добавит пользователю оптимизма. Но можно попытаться обобщить многолетний опыт использования алгоритмов оптимизации различными научными коллективами путем формирования интегрального взгляда на проблему, который может служить основой для создания разумных вычислительных методик, доступных, в том числе, неспециалисту.

Решение задачи безусловной минимизации происходит *в четыре этапа*: *спуск в овраг, движение по дну оврага, подход к экстремуму, уточнение экстремума.* Проблемы, преодолеваемые на этих этапах, формально похожи (минимизируем функцию), но принципиально различны по своей сути. Надежда на то, что один единственный, выбранный или «любимый», алгоритм окажется хорош на всех этапах, на наш взгляд, может в конкретном случае оказаться не слишком несостоятельной.

Спуск в овраг. Овражный характер функций имеет место, по нашим наблюдениям, в большей части прикладных исследований. Случайно (или намеренно) выбранная стартовая точка может иметь очень неудобный характер: большие градиенты, разномасштабное влияние на функцию и т.д. Типичными можно считать ситуации, когда в этой точке невозможно вычислить значение функции («нефизичность», «авосты») или когда градиентные алгоритмы не могут сдвинуться с места (нужен слишком маленький шаг). Для гарантированного продвижения на этом этапе – в случае отказа выбранного метода – разумно применить какой-либо вариант из методик стохастических покрытий, например, метод случайного мультистарта. Помимо обеспечения регулярного старта это может помочь также в нахождении значительно более привлекательного по значению функции начального приближения.

Движение по дну оврага. Этот этап обычно является самым затратным по времени выполнения, и нет никаких гарантий, что движение по дну оврага может быть успешно закончено. Специалистами приводятся примеры функций (см. [2]), для которых при совсем небольших размерностях – порядка нескольких десятков – *ни один из известных алгоритмов* оптимизации *не может получить* удовлетворительного (по аргументам) *решения.* Надеясь на лучшее (такие примеры специально конструируются и встречаются, по-видимому, редко) стоит использовать на этом этапе алгоритмы со сверхлинейной скоростью сходимости: сопряженных градиентов, квазиньютоновские, Ньютона и т.п. Основной проблемой здесь является объективная сложность вопроса: а закончен ли процесс движения по оврагу, можно ли переходить к следующему этапу? Увы, простого ответа в виде какой-либо методики нам, к сожалению, не известно. Поэтому обычно здесь царит «его величество эксперимент»: попробовали перейти к следующему этапу, осознали, что еще рано, вернулись к движению по дну оврага…

Подход к экстремуму. В окрестности экстремума характер функции очень существенно меняется. Одним из определений окрестности экстремума в унимодальной оптимизации можно считать «область недалеко от решения, в которой функция становится выпуклой». Потенциал использования этого обстоятельства, к сожалению, раскрыт далеко не полностью, поскольку новые методы выпуклой оптимизации, несмотря на красивую теорию и оценки, на наш взгляд, пока не дают особых преимуществ перед методами классическими со сверхлинейной скоростью сходимости. Но вот использование метода Ньютона, возможно регуляризованного [3], как раз может быть очень полезным, его сходимость в этой области может оказаться квадратичной.

Уточнение экстремума. Завершающая стадия оптимизационного расчета чаще всего не принимается во внимание в соответствии с логикой «модель все равно приближенная, слишком большая точность не нужна». Однако во многих задачах именно в векторе точного решения зарыта большая порция содержательной информации, отказ от борьбы за ее получение не выглядит целесообразным. Кроме того, исследователю предстоит именно на этом этапе принять весьма ответственное решение, дать ответ на естественный вопрос: решена задача или нет? Ошибки при выполнении данной оценки, получаемой (все-таки) в условиях далеко не полной информации, могут привести к серьезным репутационным потерям; в этом случае максимально возможная точность решения может оказаться очень полезной. В проблеме уточнения экстремума любые алгоритмы градиентного типа могут оказаться недееспособными; это связано, как правило, с нарастающим влиянием ошибок округления, допускаемых используемыми базовыми алгоритмами float-арифметики. Выходом из такой ситуации видится использование безградиентных методов (их часто называют «алгоритмы–доводчики»). Слишком тяжелые и медленные для работы на предыдущих этапах, эти алгоритмы, способны достаточно точно и быстро уточнить оптимальное решение. При отсутствии других возможностей можно рекомендовать метод покоординатного спуска; но значительно лучшие результаты показывает метод Пауэлла.

Предложенная идеология использована для создания многометодных алгоритмов (см., напр., [4]) и успешно применялась при решении большого числа задач, как модельных, так и содержательных.

1. Горнов А.Ю. Факторы оценки сложности задачи унимодальной оптимизации // Ляпуновские чтения, 2025. С. 15.

2. Горнов А.Ю. Стресс-тесты Ю.Е. Нестерова // Ляпуновские чтения, 2011. С.16.
3. Nesterov Yu., Polyak B. Cubic regularization of Newton’s method and its global performance // Mathematical Programming. 2006, V.108, N1. Pp.177–205.
4. Тятюшкин А.И. Многометодные алгоритмы для решения сложных задач оптимального управления // ЖВМиМФ, 2021, 61:2. С. 189–205.

НЕЛОКАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА ЦИФРОВОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

А. С. Аникин, Т. С. Зароднюк
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
tz@icc.ru

Необходимость реализовать в системах управления движущимися объектами непрерывные управляющие воздействия, по мнению многих специалистов инженерного звена, является чрезмерно жестким требованием. На практике во многих случаях возникает только дискретный набор вариантов, который может быть технически реализован без значительных погрешностей (строго говоря, непрерывное управление, представленное в форматах float-арифметики, тоже является, по факту, набором некоторых дискретных значений). Будем называть задачу поиска управления, способного принимать на отрезках непрерывности только значения из априори заданного дискретного множества, задачей цифрового оптимального управления.

Задачи такого типа возникают в целом ряде научно-практических областей, в том числе в системах управления движущимися объектами, системах АСУТП, в человеко-машинных организационных структурах, энергетических установках, холодильных агрегатах и многих других (см., например, [1]).

Рассматриваемый класс задач, конечно, не является новым. Однако в большинстве работ исследуются линейные системы, что, конечно, дает большие преимущества в удобстве используемых методик, но существенно ограничивает, на наш взгляд, область применения получаемых результатов (см., напр., [2, 3]). Задачи цифрового оптимального управления с нелинейными системами и невыпуклыми критериями качества пока изучены недостаточно.

Управляемый процесс описывается системой

$$\dot{x} = f(x, u, t),\ t \in [t_0, t_1],\ x(t_0) = x_0,\ u(t) \in \{1, \dots, v\}.$$

Существенной частью постановки задачи будем считать априори заданную сетку дискретизации $t_0 = \tau_1 < \tau_2 < \cdots < \tau_M = t_1$. Задача заключается традиционно в поиске управления, доставляющего минимум функционалу $I(u) = \varphi(x(t_1))$.

В докладе обсуждается алгоритм, построенный на основе редукции исходной задачи к большой дискретной конечномерной экстремальной постановке. В редуцированной задаче число переменных равно произведению числа интервалов дискретизации на число вариантов уровней воздействия на каждом интервале: $N = Mv$.

Для решения этой невыпуклой, в общем случае, задачи реализована модификация безградиентного алгоритма Q-поиска [4], построенная на операторах округления. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили принципиальную работоспособность предложенного подхода.

1. Шеффер Э. Индустрия Х.О. Преимущества цифровых технологий для производства // М.: Издательская группа «Точка», 2019.
2. Веремей Е.И. Алгоритмы решения одного класса задач H-inf оптимизации систем управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 3. С. 52–61.
3. Толочко О.И. Коцегуб П.Х. Розкаряка П. И. Особенности цифровой реализации оптимальных алгоритмов управления электроприводом // Донецкий национальный технический университет, 2004, С. 1–6. https://etf.donntu.ru/eapu/scientific/1_digital_implement.pdf.
4. Горнов А.Ю. Численное исследование вариантов метода Q-поиска// Материалы конференции "Ляпуновские чтения" (Иркутск, 5–9 декабря 2022 г.). 2022. С. 25.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АППРОКСИМАЦИИ МНОЖЕСТВА ДОСТИЖИМОСТИ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ*

А. С. Аникин, А. И. Тятюшкин
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
anikin@icc.ru, tjat@icc.ru

Задачи численного исследования управляемых систем дифференциальных уравнений с переменным запаздыванием относятся, очевидно, к разряду самых актуальных проблем современной теории управления. Представляется, что до создания полного вычислительного инструментария для достаточно общего случая систем такого типа сообществу специалистов предстоит еще много и напряженно поработать (см., напр., [1, 2]). Однако для некоторых частных случаев уже удалось разработать алгоритмы и технологии, способные показывать регулярные результаты для нелинейных систем небольших размерностей – на плоскости (см., напр., [3, 4]). К настоящему времени во весь рост встал вопрос эффективности и надежности расчетных схем для задач такого типа актуальных размерностей.

Аппроксимация множества достижимости (оценка множества всех вариантов развития событий в системе) дает исследователю, без сомнения, существенно более емкую и наглядную информацию о моделируемом процессе, нежели оптимальное управление для какого-либо критерия качества – всего одну точку на множестве вариантов. Однако и численное решение такой задачи требует несравненно больших вычислительных ресурсов.

В докладе обсуждается предложенная параллельная технология построения оценок множества достижимости для систем с переменным запаздыванием. В рамках реализуемого подхода производится предварительное формирование набора аппроксимирующих задач конечномерной оптимизации, совокупность решений которых позволяет сконструировать искомый результат. Требования конструктивного распараллеливания накладывает довольно жесткие ограничения на набор используемых алгоритмов конечномерной оптимизации, в частности, затруднено или просто невозможно рациональное использование множества алгоритмов с накоплением предыстории – методов сопряженных градиентов, квазиньютоновских, метода Ньютона и других. В качестве базового алгоритма для реализации технологии была выбрана специальная модификация поискового алгоритма (см., напр., [5]). С использованием предложенной технологии были произведены оценки множества достижимости для модели Хатчисона ([4]). Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Bellen A., Zennaro M. Numerical Methods for Delay Differential Equations. Oxford UPress, 2003.
2. Fridman E. Introduction to time-delay systems: Analysis and control. Springer International Publishing Switzerland, 2014.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№ гос. регистрации: 121041300060-4).

3. Горнов А.Ю., Тятюшкин А.И., Зароднюк Т.С., Аникин А.С., Сороковиков П.С. Вычислительная технология для задач аппроксимации управляемой системы с переменным запаздыванием // Ляпуновские чтения, 2024. С. 62.
4. Горнов А.Ю. проблема аппроксимации множества достижимости для управляемых систем с переменным запаздыванием // Ляпуновские чтения, 2023. С. 21–22.
5. Горнов А.Ю. Численное исследование вариантов метода Q-поиска // Ляпуновские чтения, 2022. С. 25.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ LOW K ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В. Е. Архинчеев[1, 2], М. Р. Бакланов, Б. В. Хабитуев
[1]Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
[2] Бурятский институт инфокоммуникаций (филиал) СибГУТИ
varkhin@mail.ru

Интерес к пленкам с низкой диэлектрической проницаемостью (low-k) в микроэлектронике возник в конце 1990-х годов, когда стало понятно, что, начиная с технологических размеров чипов 90-130 нм, задержки распространения сигнала в соединениях ULSI (Ultra Large Scale Integrated) схем стали превышать задержки уровне в транзисторах. Стало очевидно, что эту проблему можно решить, уменьшив задержку сопротивление-емкость (RC) в соединениях. Токопроводящие провода требовали меньшего сопротивления (R) по сравнению с традиционным алюминием, а интерметаллический диэлектрик с низким содержанием k должен был заменить традиционный SiO2 и способствовать снижению емкости (C) [1-5]. Одним из методов исследования свойств и процессов в пористых диэлектрических материалах с малым значением диэлектрической проницаемости k является перколяционный подход. Как известно, теория перколяции позволяет определить критические пороговые значения, определяющие различные физические свойства материалов, включая массоперенос, электропроводность, ток утечки, упругую жесткость, пробой диэлектрика и другие [6-9]. Во всех этих случаях возникновение определенного физического явления можно понимать как перколяционный переход. Следовательно, важно классифицировать различные пороговые значения перколяции. Для процессов переноса – массопереноса, электропроводности и токов утечки, необходимо перколяционные пути, проходящие через всю систему и которые обеспечивают перемещение молекул, ионов или носителей заряда через пористую структуру. Для такого переноса достаточно, чтобы в системе сформировался квазиодномерный перколяционный кластер. Однако механическая жесткость материала требует формирования трехмерного «упругого» перколяционного кластера. В отличие от проводимости, где достаточно иметь узкие нитевидные пути, для жесткости требуется пенообразная сеть взаимосвязанных пустот. Только такая каркасная трехмерная структура покрытия может обеспечить объемную механическую устойчивость к деформации. Интересно также, что и пробой диэлектрика также может быть описан перколяционным способом, но критическая структура перколяционного кластера отличается как от кластера проводимости, так и от эластичного кластера. Разрушение по зигзагообразным, одномерным траекториям энергетически невыгодно; вместо этого требуется образование трехмерного скопления слабых областей (например, пор или дефектов), которые могут поддерживать распространение канала разрушения. Соответственно, в пористых диэлектриках с малым значением k можно определить, по меньшей мере, три различных порога просачивания: порог перколяции по проводимости, для него характерно формирование квазиодномерных охватывающих кластеров для переноса заряда и массы; порог упругой перколяции — формирование трехмерной каркасной эластичной сети для обеспечения механической жесткости; порог просачивания пробоя — формирование трехмерного кластера просачивающихся дефектов, приводящего к разрушению диэлектрика.

1. Havemann, R.H.; Hutchby, J.A. High-performance interconnects: An integration overview. Proc. IEEE 2001, 89, 586–601. https://doi.org/10.1109/5.929646.
2. Ravindra, N.M. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). J. Electron. Mater. 2001, 30, 1478–1627.
3. Ryan, E.T.; McKerrow, A.J.; Leu, J.; Ho, P.S. Materials issues and characterization of low–k dielectric materials. MRS Bull. 1997, 22, 49–54. https://doi.org/10.1557/S0883769400034205.
4. Harper, C. Electronic Packaging and Interconnection Handbook, 4th ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2004.
5. Maex, K.; Baklanov, M.R.; Shamiryan, D.; Lacopi, F.; Brongersma, S.H.; Yanovitskaya, Z.S. Low dielectric constant materials for microelectronics. J. Appl. Phys. 2003, 93, 8793–8841. https://doi.org/10.1063/1.1567460.
6. Vanstreels, K.; Wu, C.; Gonzalez, M.; Schneider, D.; Gidley, D.; Verdonck, P.; Baklanov, M.R. Effect of pore structure of nanometer scale porous films on the measured elastic modulus. Langmuir 2013, 29, 12025–12035. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la402383g.
7. R. Cohen, S. Havlin, S. Complex Networks: Structure, Robustness and Function*. Cambridge University Press. 2010
8. M. Sahimi, Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock. Wiley-VCH, 2011 Mungunsuvd Gerelt-Od,Md Rasadujjaman,Valerii E. Arkhincheev,Konstantin A. Vorotilov andMikhail R. Baklanov, Phenomenological Analysis of Percolation Phenomena in PorousLow-k Dielectrics, *Coatings* 2025, *15*(10), 138; https://doi.org/10.3390/coatings15101138 — 1 Oct 2025.

ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НЕГОЛОНОМНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. В. Банщиков
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
bav@icc.ru

В докладе обсуждаются вопросы автоматизации исследования динамики и устойчивости стационарных движений неголономных механических систем в квазикоординатах.

С этой целью разработано программное обеспечение (далее – ПО) [1] для построения в символьном виде нелинейных уравнений движения систем, состоящих из взаимосвязанных абсолютно твёрдых тел. Механическая система имеет неголономные связи (кинематические неинтегрируемые соотношения). Связи предполагаются линейными, однородными и стационарными. Пользователь формирует символьное описание конкретной неголономной системы, используя формализм Лагранжа. Например, вводит вектора обобщённых координат и квазискоростей, количество неголономных связей, выражение кинетической энергии и другие данные. В результате получает на компьютере дифференциальные уравнения движения в форме Эйлера-Лагранжа в квазикоординатах [2] для исследуемой системы.

В рамках качественного анализа неголономных механических систем разработаны символьные алгоритмы и создано ПО [3] для получения линеаризованных уравнений движения (уравнений возмущённого движения в первом приближении). Среди обобщённых координат программа находит позиционные и циклические, формирует стационарное движение (решение), в окрестности которого происходит линеаризация, а также получает условия существования этого решения. В качестве подлежащих линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений используются построенные с помощью [1] уравнения движения конкретной неголономной системы.

Оба программных продукта представляют собой набор интерактивных модулей (пакетов), выполняемых в режиме интерпретации в среде системы компьютерной алгебры «*Mathematica*».

В качестве апробации рассмотрено моделирование движения «моноцикла по гладкому льду». В [4] выписаны шесть видов стационарных движений (далее –СД) в этой задаче и проанализирована устойчивость пяти из них. В представляемом докладе в аналитическом виде получены необходимые условия устойчивости шестого СД – «верчение вокруг вертикального диаметра». Проведён их символьно-численный параметрический анализ с графическим представлением области устойчивости.

1. Банщиков А.В. Символьное получение уравнений движения неголономных механических систем // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023611463 от 20.01.2023. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2023.
2. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961.
3. Банщиков А.В. Символьная линеаризация уравнений движения неголономных механических систем // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024680301 от 28.08.2024. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. 2024.
4. Лебедев Д.А., Морозов В.М. Устойчивость стационарных движений моноцикла по гладкому льду // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. Москва, 2014. С. 1872–1878.

ПРИМЕНЕНИЕ БРОКЕРОВ СООБЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА*

М. Е. Боднюк[1,2], Д. Н. Карамов[1,3], Д. С. Яковлев[1]
[1]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
[2]Иркутский государственный университет путей сообщения
[3]Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН
maks.bodnyuk@mail.ru, dmitriy.karamov@mail.ru

Современные системы мониторинга (далее – СМ) являются критически важным компонентом ИТ-инфраструктуры, обеспечивающим наблюдение за состоянием систем, приложений и сетевых ресурсов. В условиях роста сложности распределенных систем и микросервисных архитектур традиционные подходы к мониторингу становятся недостаточно эффективными. Брокеры сообщений (далее – БС) представляют собой технологическое решение, позволяющее преодолеть ограничения централизованных СМ за счет реализации асинхронной модели обработки данных.

Актуальность исследования применения БС в СМ обусловлена несколькими факторами. Во-первых, экспоненциальный рост объема метрик и логов в современных облачных средах требует новых подходов к сбору и обработке данных. Во-вторых, повышаются требования к реальному времени обработки информации для оперативного реагирования на инциденты. В-третьих, необходимо обеспечить отказоустойчивость и надежность СМ, особенно в критически важных приложениях.

Использование БС позволяет решить эти проблемы путем создания масштабируемой и отказоустойчивой архитектуры, способной обрабатывать большие потоки данных с минимальными задержками. Такие системы как RabbitMQ [1], Apache Kafka [2] и NATS Streaming [3] предоставляют необходимый функционал для построения эффективных СМ нового поколения.

Архитектурные преимущества интеграции БС в СМ включают: возможность буферизации данных при пиковых нагрузках,

– обеспечение отказоустойчивости через персистентность сообщений,
– поддержку множества производителей и потребителей данных,
– гибкую маршрутизацию сообщений между компонентами СМ.

Ключевые сценарии применения БС в мониторинге охватывают:

– сбор метрик с распределенных источников, где брокер выступает в качестве буфера между агентами и системой обработки;
– обработку событий и алертинга, обеспечивая доставку уведомлений нескольким потребителям;
– агрегирование и преобразование данных перед их сохранением в системах хранения.

Сравнительный анализ популярных БС показывает, что RabbitMQ оптимален для систем, требующих сложной маршрутизации и гарантированной доставки сообщений. Apache Kafka для обработки высокоскоростных потоков данных и

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант № 075-15-2024-533 на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

долгосрочного хранения. NATS обеспечивает минимальные задержки и простоту использования, что делает его подходящим для систем реального времени.

Практические аспекты реализации включают настройку персистентности сообщений, конфигурирование механизмов подтверждения обработки, обеспечение безопасности данных, мониторинг производительности самого БС, а также планирование емкости системы на основе прогнозируемой нагрузки.

БС в СМ позволяет создать масштабируемую, отказоустойчивую и производительную архитектуру, способную обрабатывать растущие объемы данных в реальном времени. Основными преимуществами данного подхода являются асинхронная обработка, декомпозиция системы на независимые компоненты и возможность горизонтального масштабирования. Внедрение БС значительно повышает надежность и производительность СМ, что особенно важно для современных распределенных систем и микросервисных архитектур.

БС RabbitMQ внедрен в СМ стенд имитационного моделирования локального энергетического комплекса [4]. Экспериментальное исследование подтвердило повышение надежности и производительности данной системы.

1. Hong X. J., Yang H. S., Kim Y. H. Performance analysis of RESTful API and RabbitMQ for microservice web application //2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). – IEEE, 2018. – С. 257-259.
2. Raptis T. P., Passarella A. A survey on networked data streaming with apache kafka // IEEE access. 2023. Vol. 11. P. 85333-85350.
3. Sharvari T., Sowmya Nag K. A study on modern messaging systems-kafka, rabbitmq and nats streaming // arXiv:1912.03715. 2019.
4. Карамов Д.Н., Еделев А.В., Феоктистов А.Г. Моделирование энергоснабжения объектов охраняемой Байкальской природной территории на основе возобновляемых источников энергии // Международный технико-экономический журнал. 2020. № 5. С. 7-24.

ГРАФОВЫЙ КОНСТРУКТОР НЕЙРОСЕТЕЙ

Г. А. Воловиков
Иркутский государственный университет
jezv@yandex.ru

Современное развитие технологий искусственного интеллекта требует инструментов, обеспечивающих наглядность, гибкость и доступность при проектировании и анализе нейронных сетей. Графовый конструктор нейросетей GarphNet представляет собой приложение, сочетающее визуальное моделирование с функциональностью профессиональных фреймворков. Он позволяет собирать архитектуры в виде направленного графа, где каждый узел соответствует определённой операции или компоненту модели, а связи между ними отображают потоки данных и зависимости. Такой подход упрощает процесс проектирования, способствует лучшему пониманию структуры и взаимосвязей внутри нейросети, а также открывает возможности для быстрого прототипирования, тестирования и анализа сложных архитектур без необходимости ручного написания кода.

Исследования в области визуального проектирования нейронных сетей демонстрируют устойчивый интерес к созданию интуитивных и гибких инструментов, объединяющих визуальное моделирование, аналитику и автоматизацию. Основное направление связано с представлением архитектур в виде направленных графов (DAG), где узлы отражают вычислительные операции, а связи — потоки данных и зависимости [1]. Особое внимание уделяется унификации визуальных представлений архитектур и формированию стандартов для отображения слоёв и параметров нейросетей [2, 3], что повышает читаемость моделей и облегчает их использование в исследовательских и образовательных целях. В работах [4, 5] описаны графические интерфейсы, ориентированные на пользователей без опыта программирования, упрощающие процесс сборки и тестирования моделей. Исследования [7, 8] развивают направление интерактивного анализа и оптимизации архитектур, где визуализация используется для оценки производительности и анализа параметров моделей. Наблюдается переход от статических визуализаций к интерактивным конструкторам, обеспечивающим управление архитектурой через визуальные элементы.

В основе разработанной платформы лежит представление нейронной сети в форме направленного ациклического графа (DAG), где каждый узел соответствует отдельной функции – от импорта данных и их предобработки до обучения и визуализации результатов. Такая структура делает модель прозрачной и интуитивно понятной: пользователь может наблюдать весь путь данных, отслеживать изменение параметров и метрик, а также управлять процессом обучения через визуальные элементы. Узлы конструктора охватывают широкий спектр действий: нормализацию изображений, очистку табличных данных, добавление свёрточных и полносвязных слоёв, настройку Dropout, компиляцию и запуск модели, построение графиков точности и потерь. На программном уровне система реализована на языке Python с использованием TensorFlow (Functional API), что обеспечивает возможность формировать архитектуры с ветвлениями, объединениями и произвольными маршрутами прохождения данных. Пользователю не требуется контролировать порядок операций — при соединении узлов система автоматически генерирует корректный исполняемый код. Визуальный интерфейс, созданный с применением DearPyGUI, позволяет динамически добавлять, редактировать и связывать узлы в реальном времени. Использование конфигурационных файлов делает платформу

гибкой и масштабируемой: для добавления нового узла достаточно описать его параметры, не внося изменений в исходный код. Алгоритм компиляции графа в исполняемый код основан на обходе в ширину, что гарантирует корректный порядок выполнения операций и стабильность процесса.

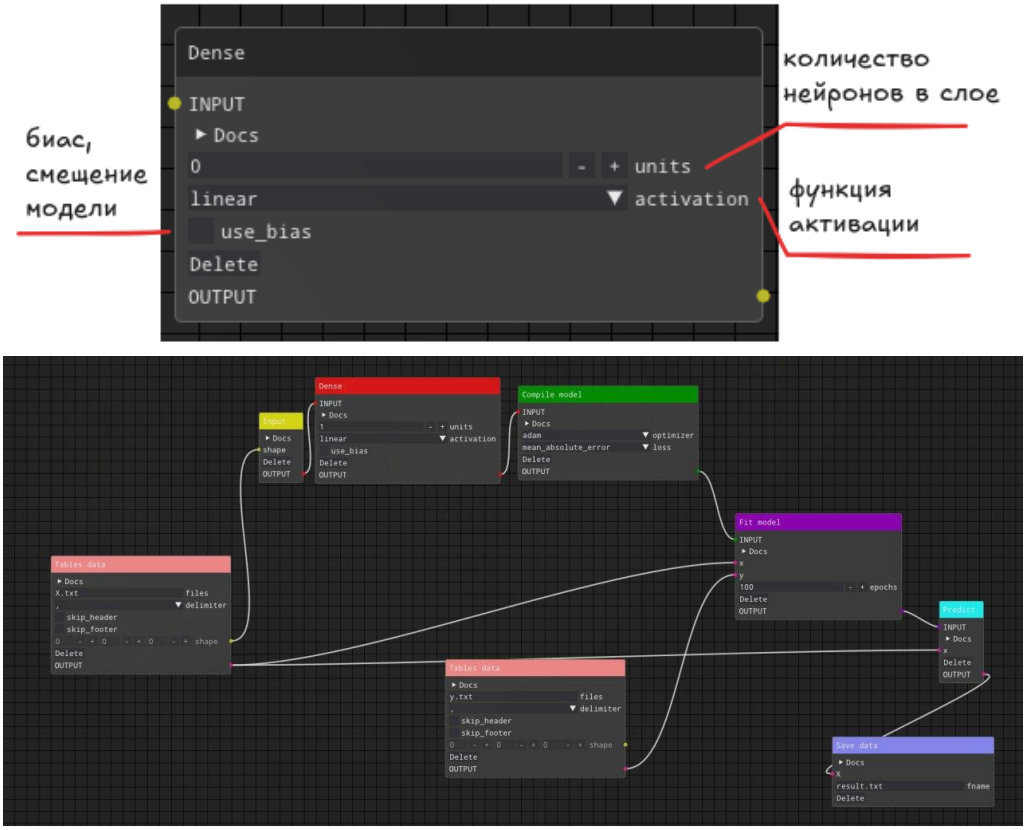


Рисунок 1. Узел и окно конструктора GarphNet

В ходе тестирования платформы были успешно реализованы модели различной сложности — от простых классификаторов точек и Inception-блоков до систем распознавания изображений. Результаты показали, что даже пользователи без опыта программирования способны собирать и обучать нейронные сети, получая при этом наглядное представление о принципах работы искусственного интеллекта.

В дальнейшем планируется развитие функционала конструктора: добавление поддержки текстовых и звуковых данных, внедрение новых типов узлов для анализа временных рядов, реализация механизмов сохранения и загрузки графов, улучшение визуального интерфейса и включение обучающих шаблонов. Таким образом, графово-визуальный конструктор нейросетей становится мощным инструментом, объединяющим интуитивность визуального моделирования с возможностями профессиональных библиотек ИИ. Он открывает широкие перспективы для экспериментов, прототипирования и исследования архитектур современных нейронных сетей.

1. Daniel H., PrototypeML: A Neural Network Integrated Design and Development Environment // Proceedings of the International Conference on Machine Learning Systems. — 2020.
2. Bäuerle A., van Onzenoodt C., Ropinski T. Net2Vis — A Visual Grammar for Automatically Generating Publication-Tailored CNN Architecture Visualizations // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. — 2019. — Vol. 25, No. 1.

3. Matthias Ehrlich, René Schüffny Neural Schematic as a Unified Formal Graphical Representation of Large-Scale Neural Network Structures // Neural Computation. — 2013. — Vol. 25, No. 6.
4. Richmond P., Cope A., Gurney K., Allerton D. SpineCreator: A Graphical User Interface for the Creation of Layered Neural Models // Neuroinformatics. — 2016. — Vol. 14, No. 1.
5. Jaegwang L., Jongsuk R. L., Sunil Ahn. GUI-Based DL-Network Designer for KISTI's Supercomputer Users // Journal of Supercomputing Applications and Research. — 2021. — Vol. 35, No. 2
6. Dylan Cashman, Adam Perer, Remco Chang, Hendrik Strobelt Ablate, Variate, and Contemplate: Visual Analytics for Discovering Neural Architectures // IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology (VAST). — 2019.
7. Jun Yuan; Mengchen Liu; Fengyuan Tian; Shixia Liu: Visual Analysis of Neural Architecture Design Spaces // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. — 2022. — Vol. 28, No. 12.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА FDE-SWFs ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ НАУЧНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ*

М. Л. Воскобойников[1], А. Г. Феоктистов[1], А. В. Еделев[1,2]
[1] Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
[2] Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН
agf@icc.ru, mikev1988@icc.ru, flower@isem.irk.ru

В настоящее время решение фундаментальных и прикладных задач зачастую осуществляется с помощью распределенных научных приложений, характеризующихся модульной структурой их прикладного программного обеспечения (далее – ПО), представленной в виде вычислительной модели, развитым системным ПО (совокупностью программ, обеспечивающих создание приложения, организацию вычислений, обработку данных и взаимодействие различных категорий пользователей приложения) и ориентацией на решение определенного класса задач в гетерогенной распределенной вычислительной среде (далее – ГРВС). В современных приложениях схема решения задачи реализуется научным рабочим процессом (далее – НРП, англ., Scientific Workflow) – информационно-вычислительной структурой, отражающей бизнес-логику предметной области в применении предметных данных, ПО и вычислительных ресурсов в процессе проведения экспериментов. Особое внимание специалистов уделяется разработке сервис-ориентированных приложений (далее – СОП).

В работе рассматриваются основные возможности инструментального комплекса Framework for Development and Execution of Scientific WorkFlows (далее – FDE-SWFs) [1], относящегося к СУРП, по разработке и применению СОП в ГРВС. FDE-SWFs активно используется в рамках инструментальной поддержки [2] разработки и применения моделей, алгоритмического и программного обеспечения и научных сервисов исследования функционирования и развития (моделирования, структурно-параметрической оптимизации, экологической и технико-экономической оценки) природно-технических систем [3], располагающихся на Байкальской природной территории.

Приводятся примеры разработанных приложений, которые демонстрируют преимущества данного инструментального комплекса в сравнении с другими известными СУРП. В частности, представляются приложения, разработанные для решения следующих задач:

– структурно-параметрической оптимизации моделей энергетических комплексов (далее – ЭК) разных уровней их территориально-отраслевой иерархии с помощью методов известной библиотеки Parallel Global Multiobjective Optimizer (PaGMO) [4];

– глобального анализа уязвимости инфраструктуры ЭК относительно крупных внешних возмущений;

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» (рег. № 121032400051-9) и грант № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

– полного перебора сценариев отказов элементов ЭК при возникновении внешних возмущений, глобального анализа чувствительности модели ЭК к внешним возмущениям и анализа потоковых показателей важности элементов ЭК в рамках комплексной оценки критичности элементов ЭК;

– сравнительного анализа времени выполнения известных научных рабочих процессов под управлением разных СУРП;

– сравнительного анализа временных затрат на разработку и применение приложений с помощью разных СУРП.

При решении ресурсоемких научных и прикладных задач в ГРВС модели, алгоритмы и инструментальные средства FDE-SWFs обеспечивают достижение следующих эффектов:

– расширение совокупности знаний вычислительной модели, необходимых для создания и применения приложений, специализированными знаниями о сущностях и процессах интеграции, тестирования и контейнеризации прикладного и системного ПО;

– согласование и улучшение базовых критериев пользователей и владельцев ресурсов при создании и применении приложений;

– автоматизацию развертывания кластера IMDG, сокращающую трудозатраты, и оценку требуемых для него ресурсов с высокой точностью;

– сокращение времени на подготовку и проведение экспериментов в целом.

1. Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г., Черных А.Н. Разработка и применение сервис-ориентированных научных приложений в инструментальном комплексе FDE-SWFs // Труды ИСП РАН. 2024. Т. 36. № 6. С. 195-214.
2. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Воскобойников М.Л., Чекан М.А., Яковлев Д.С., Боднюк М.Е., Николаев Е.П., Юмашев Е.А., Еделев Я.А. Моделирование природно-технических систем: инструментальная поддержка // Материалы Выездного совещания участников проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», 27 августа 2025 г., г. Белокуриха, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2025. С. 22–26.
3. Исаев С.В. Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды // Географический вестник. 2016. № 3(38). С. 105–113.
4. Biscani F., Izzo D. A parallel global multiobjective framework for optimization: pagmo // Journal of Open Source Software. 2020. Vol. 5, № 53. P. 2338.

АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА ПОЭТИЧЕСКОГО ТЕКСТА: МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО СЛОВАРЯ ЛЕКСИЧЕСКИХ КОМБИНАЦИЙ

О. Ю. Гавенко[1, 2, 3], С. Д. Обершт[1]
[1] Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
[2]Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий
[3]Новосибирский государственный университет
olga.yu.gavenko@mail.ru
sofiaobersht@yandex.ru

Лексические комбинации – набор слов, повторяющихся рядом друг с другом, – учитывают «вертикальные» связи лексем внутри поэтического текста и между различными произведениями, позволяя выявлять скрытые и неочевидные особенности, характерные для стиля того или иного автора и поэтического языка в целом [1]. Автоматизация извлечения лексических комбинаций осложняется характеристическими особенностями поэтического текста, особенно когда речь идет об обработке корпусов большого объема: многомерный анализ текстов должен учитывать наличие четкой структуры уровней стиха и связей между ними [2]. Современные технологии в области компьютерной лингвистики не только помогают собирать корпуса текстов в базы данных и обрабатывать их, но и интегрировать их между собой через такие инструменты, как словари. Они зарекомендовали себя как удобный инструмент для исследований в лингвистике, филологии и литературоведении, при этом, как отмечают исследователи в лексикографии, переход на электронные словари и автоматизация процесса его составления предоставляют такие преимущества как гибкость, динамичность, возможность пополнения словаря, параллельность и скорость обработки запросов, а также объединение нескольких типов словарей в одну систему. Электронный словарь, как упорядоченная система хранения и представления отдельных лексикографических единиц, позволяет обрабатывать одновременно огромное количество текстовой информации, ускорять поиск и предоставлять пользователю все ссылки на источники, найденные в отобранных корпусах и необходимых для дальнейшего исследования.

Важнейшим этапом составления цифрового словаря лексических комбинаций является поиск так называемых слов-спутников, составляющих цепочку (комбинацию) лексем внутри отрывка или полного текста: в зависимости от поставленной задачи объем текстовых данных может ограничиваться одним автором, периодом или тематикой. При этом количество слов-спутников в комбинации ничем не ограничено, напротив, представляет интерес исследование любого возможного сочетания: пары слов, тройки и т.д. Однако, на сегодняшний день нет программных инструментов, которые бы полностью или хотя бы в большей степени автоматизировали процесс поиска лексических комбинаций в таком масштабе.

В работе представлен аналитический обзор последних исследований, доказывающих актуальность применения лексических комбинаций в изучении поэтических текстов на дискурсивном уровне. Сравнительный анализ методов составления словарей в смежных областях лексикографии демонстрирует необходимость в подобного рода инструменте. Авторами работы предложена методология составления цифрового словаря лексических комбинаций как инструмента, направленного на сбор, хранение и обработку большого объема

текстовых данных и представления результата в виде, соответствующем экспертным требованиям.

1. Павлова Л.В., Романова И.В., Самойлова Т.А. Решение филологических проблем с помощью программного комплекса "Гипертекстовый поиск слов-спутников в авторских текстах" // Известия Смоленского государственного университета. 2013. № 2 (22). С. 314–323.
2. Kozhemyakina O.Yu. Conceptual design of the software system for automated complex analysis of poetic texts // Вычислительные технологии. 2022. Т.27. №2. С.122-137. ISSN 1560-7534. EISSN 2313-691X.

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЕМАНТИЧЕСКОЙ РАЗМЕТКИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ АНАЛИЗЕ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ТЕКСТОВ

О. Ю. Гавенко[1, 2, 3], Ю. М. Илющенко[1, 3]
[1]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
[2]Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
[3]Новосибирский государственный университет
olga.yu.gavenko@mail.ru
iuliia.iliushchenko@gmail.com

Использование семантической разметки открывает новые возможности автоматизированного анализа больших корпусов текстов, недоступные при применении традиционных методов филологических исследований. Информационные технологии в процессе семантической разметки текста могут быть использованы на различных этапах: во время сбора данных, при выделении семантических категорий для предстоящей разметки, для непосредственной разметки и представления аннотированного текста в машиночитаемом формате, а также при цифровом анализе и визуализации данных; каждый этап процесса семантической разметки может быть автоматизирован с помощью специфичных технологий.

Для сбора текстов для дальнейшей их обработки может применяться парсинг (parsing) – «автоматизированный сбор и систематизация данных» [Юлкина и др., 2023]. Однако, несмотря на то, что возможно создание парсера под собственные цели, для подобных задач исследователям зачастую достаточно готовых инструментов, поскольку большая часть открытых решений обладает широким функционалом, способным закрыть потребности по сбору данных. Так, в проекте Chekhov Digital [Северина и др., 2024] готовая библиотека Beautiful Soup, предназначенная для извлечения данных с веб-страниц, используется для сбора материала (оригинальных текстов и переводов) из открытых источников.

На этапе выделения категорий семантической разметки применимы различные методы автоматической обработки текста, в частности, в вышеупомянутом проекте Chekhov Digital применяются метод тематического моделирования при помощи машинного обучения и программные библиотеки для вычисления семантической близости между словами в векторных семантических моделях [Северина и др., 2024], тем самым выделяются семантические категории, которые далее служат основой для разметки корпуса. Применение принципов дистрибутивной семантики и цифровых векторных моделей демонстрирует значительный исследовательский потенциал, однако на современном этапе их интеграция в реальные проекты по семантической разметке остаётся частичной и требует дальнейшего развития.

Для представления семантических характеристик текста в машиночитаемом формате используются специализированные языки разметки, широко распространённые в цифровой среде. Одним из наиболее распространённых стандартов для лингвистической разметки текстов является формат TEI (Text Encoding Initiative), основанный на языке XML (eXtensible Markup Language) [The TEI Consortium]. Разметка с использованием тегов TEI внедрена как в отечественные (Tolstoy Digital, Chekhov Digital), так и в зарубежные (DraCor, ELTE Poetry Corpus) проекты цифровой гуманитаристики, что обеспечивает стандартизацию разметки.

Задача проставления семантических тегов в некоторых проектах по семантической разметке решается с помощью алгоритмов машинного обучения. Так,

в веб-платформе для семантической разметки англоязычных исторических художественных текстов Curatr [Leavy et al., 2019] внедрена функция активного дообучения, при которой модель, предлагающая наиболее вероятные семантические теги, постоянно дообучается на правках, вносимых экспертом, что значительно повышает точность последующей автоматической разметки. Следует отметить, что на данный момент сопоставимые по функциональности русскоязычные академические проекты, где используются методы активного дообучения для семантической разметки, отсутствуют, что указывает на перспективность развития данного направления в отечественных исследованиях.

Семантическая разметка также способна выступать как ключевой инструмент для многомерного анализа художественного пространства текста, позволяя строить сети смысловых связей, фиксировать персонажей, топонимы, мотивы и их взаимодействия. Такие сети могут быть представлены в виде графов, где узлами являются герои или концепты, а рёбра отражают их взаимосвязи, как это реализовано в проекте DraCor [Fischer et al., 2019]. При корректно заданной разметке персонажей возможно построение графа социальных взаимодействий, например, для романа-эпопеи «Война и мир» алгоритм способен визуализировать сеть связей героев и количественно оценить их роль в сюжетной динамике [Bonch-Osmolovskaya, 2016].

Интересным решением в плане методов, применяемых для визуализации данных, пользуется проект «Mapping St Petersburg» [Mapping St Petersburg: Experiments in Literary Cartography, 2016], где методология цифровой картографии способствует изучению локального петербургского текста и улучшению понимания взаимодействия литературы и места. Данные при этом визуализируются в виде точек на карте: информация о вымышленных местах проецируется на реальную карту Санкт-Петербурга, позволяя лучше представить контекст произведения. На сайте http://armcorsite.ict.nsc.ru, посвящённом проекту «Армянский текст русской поэзии» (грант РНФ 22-18-00339 «Электронный ресурс “Армянский текст русской поэзии”: репрезентация локального текста русской литературы»), визуализация реально существующих мест, встречающихся в собранном корпусе, представлена в виде точек на карте, что даёт исследователям возможности углубленного изучения топонимики локального армянского текста.

Однако на сегодняшний день отсутствуют комплексные решения, обеспечивающие интеграцию цифровых инструментов семантической разметки на всех этапах автоматизированного анализа художественного текста. Перспективной представляется интеграция в одном инструменте различных технологий с целью реализации многоуровнего анализа текстовых данных. При этом, особое значение имеет максимальная автоматизация процедур разметки и анализа, что позволит существенно снизить трудоёмкость обработки текстов, а также дополнить лингвистические исследования благодаря выявлению скрытых слоёв смысла.

1. Юлкина Н. С. Сравнение и анализ методов и инструментов, применяемых для сбора данных / Н.С. Юлкина и др. // Молодой исследователь Дона. – 2023. – Т. 8. – № 6. – С. 49-54.
2. Северина Е. М. Проект Chekhov Digital: семантическая разметка параллельного корпуса переводов художественной прозы А. П. Чехова на немецкий язык / Е.М. Северина и др. // Филология: научные исследования. – 2024. – Проект Chekhov Digital. – № 4. – С. 73-82.
3. Bonch-Osmolovskaya A. A. Digital Edition of Leo Tolstoy Works: Contributing to Advances in Russian Literary Scholarship / A.A. Bonch-Osmolovskaya // Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences. – 2016. – Vol. 9. – Digital Edition of Leo Tolstoy Works. – № 7. – P. 1605-1614. – doi:10.17516/1997-1370-2016-9-7-1605-1614.
4. Fischer F. Programmable Corpora: Introducing DraCor, an Infrastructure for the Research on European Drama. Programmable Corpora / F. Fischer et al. – Zenodo, 2019.

5. Leavy S. Curatr: A Platform for Semantic Analysis and Curation of Historical Literary Texts / S. Leavy et al. // arXiv:2306.08020 [cs]. – 2019. – Vol. 1057. – Curatr. – P. 354-366.
6. Mapping St Petersburg: Experiments in Literary Cartography [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://slavic-dh.org/directory/mapping-st-petersburg-experiments-in-literary-cartography/.
7. The TEI Consortium. The TEI Guidelines / The TEI Consortium.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕБ-ПЛАТФОРМЫ С ИГРОВЫМИ МЕХАНИКАМИ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И ВОВЛЕЧЕНИЯ УЧАСТНИКОВ ПРЕДСТОЯЩЕГО МЕРОПРИЯТИЯ

О. Е. Галиулина
Иркутский государственный университет
oksana17.06@bk.ru

Для поддержания интереса аудитории к мероприятиям на этапе анонса особенно важны инструменты вовлечения, которые не только информируют о событии, но и создают устойчивую мотивацию к участию. Одним из эффективных решений может стать веб-платформа, использующая игровые механики для привлечения и удержания внимания потенциальных участников. Такая платформа способна формировать у пользователей ощущение сопричастности и постепенно подготавливать их к самому мероприятию через интерактивные элементы и небольшие игровые задания.

Основой концепции выступают принципы геймификации, которые сегодня широко применяются в образовательных, корпоративных и маркетинговых цифровых продуктах. Включение игровых механик в привычные сценарии взаимодействия позволяет повысить вовлечённость пользователей, сделать процесс подготовки к мероприятию интересным и эмоционально привлекательным. В платформу планируется внедрить систему накопления очков, получения достижений за выполнение заданий, таблицу лидеров, а также коллекционирование виртуальных артефактов. Эти решения зарекомендовали себя как эффективные инструменты для поддержания активности и соревновательного духа среди участников.

Техническая реализация проекта основана на использовании современных веб-технологий. Для разработки клиентской части выбрана библиотека React.js, обеспечивающая создание интуитивного пользовательского интерфейса. Серверная часть будет реализована на основе фреймворка FastAPI, что обусловлено его высокой производительностью и простотой интеграции с фронтенд-решениями.

На этапе проектирования предстоит решить ряд ключевых задач, включая разработку архитектуры системы, проектирование схемы базы данных, определение пользовательских сценариев и интеграцию игровых механик. Особое внимание будет уделено созданию системы ролей пользователей и разработке административной панели для организаторов мероприятий.

Полученные в ходе разработки результаты станут основой для дальнейшего расширения функциональности и внедрения аналогичных решений в другие области. Разработанная платформа может служить прототипом для интерактивных промо-кампаний, обучающих программ, корпоративных сервисов и образовательных приложений с элементами геймификации, направленных на повышение мотивации и вовлечённости пользователей.

1. 5 идей как использовать геймификацию на ивентах [Электронный ресурс]. – URL: https://adpass.ru/5-idej-kak-ispolzovat-gejmifikatsiyu-na-iventah/ (дата обращения: 15.09.2024).
2. Интеграция FastAPI с фронтендом на React, Vue, Nuxt или Svelte [Электронный ресурс]. – URL: https://plantagoweb.ru/blog/integratsiya-fastapi-s-frontendom-na-react-vue-nuxt-ili-svelte-8f7c12/ (дата обращения: 20.09.2024).
3. Gamification in event management: modern approaches [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/articles/829474/ (дата обращения: 12.09.2024).

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА Q-ПОИСКА ДЛЯ ЗАДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ ПОРЯДКОВОГО ОРАКУЛА

А. В. Гасников[1], А. Ю. Горнов[2]
[1]Университет Иннополис
[2] Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Привычные задачи конечномерной оптимизации традиционно ассоциируются с поиском минимума или максимума функции многих переменных. Однако такое «информационное богатство» в системах поддержки принятия решений, например, имеет место далеко не всегда. Во многих ситуациях, с которыми сталкиваются эксперты, нет возможности точно дать количественный ответ на вопрос о свойствах интересующего нас объекта. В таких случаях ослаблением требования четко отмеренного ответа («Сколько взвесить черешен?») может оказаться вопрос эксперту типа «какая из альтернатив» лучше?

Порядковым оракулом принято называть функционал, который для любых двух допустимых точек может дать строгий ответ, какая из них лучше или хуже. Пусть D – допустимая область, $D \in R^n$. Тогда порядковым оракулом будем называть $O(x,y) \in \{-1,+1\}$: {для каждого $x \in D$, для каждого $y \in D$}. Задачи минимизации порядковых оракулов появились совсем недавно, из публикаций по этой тематике можно пока указать только [1, 2]. Однако актуальность проблемы, особенно в аспекте рекомендательных систем, не вызывает никакого сомнения.

В докладе обсуждается предложенный алгоритм нелокального поиска для задачи минимизации $O(x,y)$, основанный на идее Q-поиска, реализованной нами ранее для стандартных задач безусловной минимизации (см., напр., [3]). Первой проблемой, с которой мы столкнулись, оказалась, что вполне естественно, проблема полного отсутствия тестовых примеров. Было предложено для проверки работы алгоритма формировать порядковый оракул с использованием обычных функций: $O_1(x,y) = 1$, если $f(x) < f(y)$; $O_1(x,y) = -1$, если $f(x) \geq f(y)$). Для проверки работоспособности алгоритмов на оракулах такого типа стало возможным использовать уже имеющиеся тестовые коллекции.

Полученную модификацию алгоритма можно рассматривать как глубокое обобщение метода центров Левина-Ньюмена [4] для невыпуклых задач. Предложенный алгоритм реализован на языке С. В состав реализации включены также средства оценки качества полученных решений, что оракулов типа O_1 возможно тривиально сделать путем дополнительных вычислений критерия с применением информации о значениях вспомогательной функции $f(x)$. Выполненные тестовые расчеты подтвердили достаточно высокую вычислительную эффективность алгоритма. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Lobanov A., Gasnikov A., Krasnov A. The Order Oracle: a New Concept in The Black Box Optimization Problems // arXiv preprint arXiv:2402.09014. – 2024.
2. Zhang C., Li T. Comparisons Are All You Need for Optimizing Smooth Functions // arXiv preprint arXiv:2405.11454. – 2024.
3. Горнов А.Ю. Численное исследование вариантов метода Q-поиска // Материалы конференции "Ляпуновские чтения" (Иркутск, 5–9 декабря 2022 г.). 2022. С. 25.
4. Левин А.Ю. Об одном алгоритме минимизации выпуклой функции // ДАН, 1965. 160(6). С. 1244–1247.

ИНТЕГРАЦИЯ РАЗНОРОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

А. С. Гаченко
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gachenko@icc.ru

Данное исследование направлено на разработку фундаментальных основ, методов и технологий для комплексного экологического мониторинга и прогнозирования с использованием цифровых платформ. Целью является создание системы, обеспечивающей сбор, хранение, обработку и анализ больших массивов разнородных пространственно-временных данных, а также реализацию комплекса математических моделей и методов машинного обучения. Разработки проходят апробацию на данных по Байкальской природной территории (далее – БПТ) при участии научных коллективов из ряда академических институтов. Методология включает аналитические исследования по сбору разноформатных данных из различных источников, включая сеть распределенных станций по сбору данных, с последующей их интеграцией в прикладную цифровую платформу (далее – ПЦП). Платформа обеспечивает алгоритмическое взаимодействие сервисов между независимыми участниками в единой информационной среде (Рисунок 1).

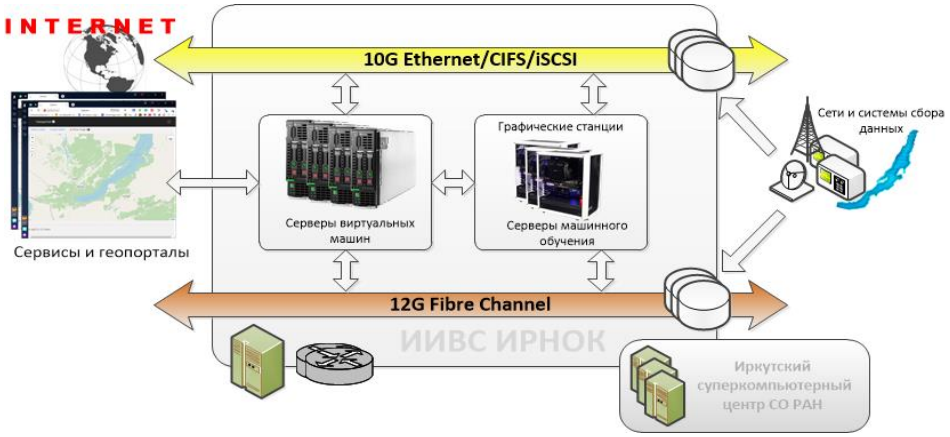


Рисунок 1. Схема хранения и обработки данных прикладной цифровой платформы.

Налажен процесс по сбору данных со станций автоматического мониторинга погодных данных «САМ-ЦБ2» и других важных научных наборов с различных приборов мониторинга, которые предназначены для удаленной автономной регистрации и сбора данных. Передача данных осуществляется с использованием каналов GSM-связи и проводных сетей. Данные поступают на сервер разработчиков в БД. Далее происходит предварительная обработка и нормализация первичных данных при помощи скриптов на языке Python. После этого данные реплицируются на сервер ИДСТУ СО РАН и хранятся в базе данных СУБД PostgreSQL.

Также на сервер поступают и другие виды научных данных: пожары, гари, вырубки, грозовые разряды, загрязняющие вещества в атмосфере, уровни воды отдельных рек БПТ и озера Байкал, измерения вертикального распределения

температуры и скоростей течений на пелагических буйковых станциях в озере Байкал, ледовая обстановка и др.

Все данные хранятся и обрабатываются в специализированном центре коллективного пользования (ЦКП).

Разработана и внедрена интегрированная система для сбора, хранения и анализа данных, обеспечивающая оперативный доступ к актуальной информации о состоянии экосистем Байкальской природной территории. Ключевым результатом стала прикладная цифровая платформа (ПЦП), которая служит основой для развития системы мониторинга, обеспечивая интеграцию разнородных данных и их комплексный анализ.

Главные преимущества системы — не только в повышении эффективности мониторинга, но и в создании основы для точного прогнозирования экологических процессов, что критически важно для обоснованного принятия управленческих решений. Универсальность предложенных методов позволяет применять данный подход в других регионах.

Проведенная работа открывает новые перспективы для создания высокоэффективных систем экологического мониторинга и прогнозирования, внося вклад в обеспечение экологической безопасности и устойчивое развитие регионов.

ТЕСТОВАЯ ЗАДАЧА МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА МОРСА СВЕРХБОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ В ДИСКРЕТНОЙ ПОСТАНОВКЕ

А. Ю. Горнов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Широко известный программистский тезис «Легче написать две программы, чем узнать, какая из них лучше» [1] может быть, казалось бы, легко транслирован на оптимизационные задачи: «Легче придумать два алгоритма оптимизации, чем…». Однако, в отличие от искусства программирования, исследователи в области численной оптимизации находятся в значительно лучшем положении. В нашем случае, «по определению», имеется точный критерий качества алгоритма – его способность достигать решения с лучшими, чем у других, значениями функции. Это огромное преимущество, которым, на наш взгляд, мы пока не научились полноценно пользоваться.

Для сравнения алгоритмов в задачах некоторых типов (выпуклые, унимодальные, …) могут быть, в принципе, использованы энергично развиваемые в последние годы методики гарантированных оценок числа операций (см, напр., [2]). Однако, при ближайшем рассмотрении, оказывается, что в конкретных задачах получаемые гарантированные оценки являются невероятно завышенными, и эти теоретические результаты, как правило, не могут служить основой для практического сравнения алгоритмов. Принятие решения о полезности предложенного алгоритма оптимизации опирается, как правило, на тестирование. Правила тестовых работ достаточно давно и четко сформулированы в известной монографии Б.Т. Поляка [3]. Среди множества известных нам коллекций тестов, к сожалению, пока нам не удается найти те, которые были бы достаточно удобными для быстрой оценки новых алгоритмов. В связи с этим, по-видимому, практически все развивающиеся научные группы создают свои наборы тестовых задач, которые, в большинстве случаев, оказываются малоизвестными.

Для отсева неперспективных вариантов алгоритмов достаточно иногда иметь даже один единственный прецедент экстремальной задачи, но обладающий достаточно удобными свойствами, в первую очередь, высокой сложностью. В докладе рассматривается такая тестовая задача вместе с известным нам наилучшим ее решением. Необходимо минимизировать потенциал Морса.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=i+1}^{N} e^{\rho(1-r_{ij})} \left(e^{\rho(1-r_{ij})} - 2 \right) \to \min,$$

$$\rho = 3,$$

$$r_{ij} = \sqrt{\left(x_{3(i-1)+1} - x_{3(j-1)+1} \right)^2 + \left(x_{3(i-1)+2} - x_{3(j-1)+2} \right)^2 + \left(x_{3(i-1)+3} - x_{3(j-1)+3} \right)^2}$$

при числе атомов $N = 333$ $(n = 999)$ на дискретном множестве вариантов $x_i \in [-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$. Наилучшее из известных нам решений имеет значение функции 127.69699.

Приглашаем заинтересованных специалистов к оперативному сравнению результатов расчетов.

1. Кнут Д. Искусство программирования // Т. 1-3. М., Мир, 1976–1978.
2. Нестеров Ю.Е. Алгоритмическая выпуклая оптимизация // Москва, Ленанд, 2024.
3. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию // М., Наука, 1983.

ТРЕХСЕТОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

А. Ю. Горнов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

При численном решении задач оптимального управления возникает несколько технологических проблем, существенно усложняющих получение адекватного решения. Одной из основных проблем можно считать ухудшение свойств задачи при использовании традиционных способов дискретизации кусочно-линейными или кусочно-постоянными функциями (см. [1]). Еще одним источником неприятностей можно назвать слишком большую размерность сетки дискретизации, что приводит к аппроксимирующим задачам существенно завышенной размерности, и, следовательно, сложности (см. [2]). Завершает «список неприятностей» необходимость получать оценки градиентов, что при использовании сопряженной системы влечет необходимость координации двух процессов интегрирования – в прямом и обратном времени [3].

В работе рассматривается технология дискретизации задачи оптимального управления, которая, на наш взгляд, может быть признана максимально свободной от вышеуказанных недостатков.

В рамках предложенной технологии используется не две, как принято, а три сетки дискретизации. *Одна сетка* нужна для представления управления в программе («сетка дискретизации управления» или «просто сетка дискретизации»). *Вторая сетка* необходима для корректной работы с фазовыми траекториями («сетка дискретизации траектории», «сетка интегрирования»). *Третья сетка,* чаще всего с постоянным шагом, нужна для удобства демонстрации результатов расчетов пользователю и визуализации в отчетных источниках. Для доопределения управления между узлами первой сетки используются кубические сплайны [4]; на участках нарушения сплайнами прямых ограничений производится проецирование на допустимую область. Интегрирование системы выполняется с помощью стандартной программы DOPRI5 [5], которая и порождает сетку интегрирования. Для решения поставленной конечномерной задачи может быть использован любой поисковый алгоритм невыпуклой оптимизации, в нашем случае это комбинация методов Q-поиска [6].

Предлагаемая трехсеточная технология также дает возможность построения вложенного набора аппроксимирующих задач растущих размерностей и повышения надежности расчетов путем их последовательного решения. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Гасников А.В., Горнов А.Ю. Почему для задач оптимального управления плохо работают алгоритмы, основанные на теории конечномерной оптимизации // Ляпуновские чтения. 2024. С. 49–50.
2. Немировский А.С., Юдин Д.Б. Сложность задач и эффективность методов оптимизации // Наука. 1979.
3. Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С. Методики численной оценки градиента в задаче оптимального управления // Ляпуновские чтения. 2024. С. 58.
4. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений // Москва. М.: Мир. 1980. 280 с.
5. Хайрер Э., Нёрсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи // Москва. М: Мир. 1990. 512 с.
6. Горнов А.Ю. Численное исследование вариантов метода Q-поиска // Материалы конференции "Ляпуновские чтения" (Иркутск, 5-9 декабря 2022 г.). 2022. С. 25.

ФАКТОРЫ ОЦЕНКИ СЛОЖНОСТИ ЗАДАЧИ УНИМОДАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А. Ю. Горнов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Одной из самых привлекательных профессиональных возможностей специалиста по оптимизации является, на наш взгляд, возможность быстро оценивать *реальную* сложность поставленных перед ним задач. Не все задачи, увы, можно решить, а потерянное время и репутационные потери в глазах постановщика проблемы в ряде случаев могут оказаться критическими. Для задач выпуклой оптимизации в настоящее время активно развивается красивая математическая теория, позволяющая точно оценивать число операций, необходимых для достижения экстремума, в данном случае, единственного, в зависимости от скорости роста (констант Липшица) функции и/или ее градиентов, констант строгой выпуклости и др. (см., напр., [1, 2]). Имеются похожие единичные работы и для класса унимодальных функций, в которых они (функции) называются невыпуклыми (см., напр., [3, 4]). Однако при решении прикладных задач, к сожалению, эти теоретические результаты помогают далеко не всегда. Причину указанного «проскальзывания» мы видим, с одной стороны, в чрезмерно общем исповедуемом подходе «минимаксного типа» («гарантируем оценку для любой функции обсуждаемого класса»), с другой стороны, в наличии существенных факторов в задаче, влияние которых пока не удается строго математически оценивать.

В докладе обсуждается набор «информационных» факторов для унимодальной задачи оптимизации, которые целесообразно учитывать априори при оценке сложности поставленной проблемы и оценке реальности достижения правдоподобных результатов за разумное время. Среди них: 01) размерность задачи (100+, 10000+, 1000000+, 1000000000+,...); 02) наличие доступных формул для градиентов (да, нет); 03) размер констант роста (констант Липшица функции и производных) и ширина компонент допустимого бруса; 04) знание нижней оценки (да, нет); 05) нижняя оценка оптимального значения и/или уровень низкопотенциальности; 06) размер шума при вычислении функции и/или градиентов (процент от значащих цифр); 07) степень «тяжести» функции (число вычислений оракула в секунду); 08) степень вырожденности оврагов (затраты на характерные локальные спуски в секундах); 09) степень вырожденности экстремумов (отношение максимальных и минимальных собственных чисел гессиана); 10) «платообразность» (да, нет); 11) частичная вычислимость (да, нет); 12) динамичность – наличие внутренней рекуррентной структуры (да, нет); 13) критериальность либо аргументность задачи (0,1); требования точности к достигаемому результату; 14) гладкость (да, нет); 15) достаточность линейной оперативной памяти (да, нет); 16) достаточность квадратичной оперативной памяти (да, нет); 17) возможность представления в виде древовидной структуры («дерево Канторовича-Ершова-Нестерова») (да, нет); 18) параллелизуемость функции и/или градиентов (да, нет).

При наличии вычислительного опыта можно экспертно оценивать как реалистичность ее решения за имеющееся время, так и затраты на его достижение.

1. Нестеров Ю.Е. Введение в выпуклую оптимизацию // Москва, МЦНМО, 2010.
2. Нестеров Ю.Е. Алгоритмическая выпуклая оптимизация // Москва, Ленанд, 2024.
3. Ghadimi S., Lan G. Accelerated gradient methods for nonconvex nonlinear and stochastic programming // Mathematical Programming, 2016, 156, 1-2, 59–99.
4. Lan G. Lectures on Optimization Methods for Machine Learning // Atlanta, 2019. 583 pp.

МЕТОДИКА РАЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА ДВУХМЕТОДНЫХ АЛГОРИТМОВ БЕЗУСЛОВНОЙ МИНИМИЗАЦИИ

А. Ю. Горнов, П. С. Сороковиков
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Понятие «многометодный алгоритм» было введено в научный обиход, по всей видимости, Александром Ивановичем Тятюшкиным (см., напр., [1, 2]). Наверное, можно найти и более ранние работы, в которых применялись комбинации алгоритмов, но именно начиная с указанных статей, как нам кажется, об этом подходе специалисты стали говорить как о, несомненно, перспективном. Осознав, что решение сложных прикладных экстремальных задач в автоматическом режиме мало реально, сообщество специалистов все чаще стало использовать методики «биомеханизации»: в дополнение к библиотекам алгоритмов оптимизации в развитых программных разработках стали создавать также диалоговые интерфейсы, позволяющие привлекать опыт математика-вычислителя для повышения скорости и обеспечения надежности получения оптимальных решений. Проблема создания многометодных алгоритмов тем самым была переложена на плечи человека-оператора. В известном проекте ДИСО (см., напр., [3]) ядром системы была стандартизованная библиотека алгоритмов, на основе которой стало возможно квалифицированному пользователю в диалоговом режиме строить цепочки алгоритмов, наилучшим, по его мнению, образом решающие рассматриваемые экстремальные задачи: безусловной и условной оптимизации, оптимального управления, глобального поиска. К настоящему времени парадигма многометодных алгоритмов является доминирующей. Но мечта об «автоматном» решении любых задач оптимизации без участия человека пока нас не покинула.

В докладе предлагается экспериментальный способ «исчисления» эффективных двухметодных безградиентных алгоритмов на основе коллекции биоинспирированных методов нелокального поиска. В состав коллекции включены предложенные в последние несколько лет алгоритмы tasmanian_devil_optimization, fox_optimization, honey_badger_algorithm, artificial_rabbits_optimization, coati_optimization_algorithm, golf_optimization_algorithm, osprey_optimization_algorithm, frilled_lizard_optimization_algorithm, walrus_optimization_algorithm, zebra_optimization_algorithm, дополненные уже традиционными поисковыми методами. Способ определения лучшей пары основан на многовариантном вычислительном эксперименте: для всех сочетаний алгоритмов запускаются индивидуальные расчеты, результаты которых суммируются по системе «футбольного чемпионата». Произведенные состязания алгоритмов для различных задач снова интегрируются в единую таблицу занятых на этапах мест, что и позволяет произвести ранжировку претендентов и выявить наиболее успешные их сочетания.

Проведенные эксперименты показали, что единого победителя среди претендентов на участие в паросочетаниях в составе рассматриваемой библиотеки не

существует; в различных задачах разные алгоритмы могут показать совершенно разные результаты. Приводятся итоги вычислительных экспериментов.

1. Тятюшкин А.И. Многометодная технология для расчета оптимального управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 2003. — №3. С. 59–67.
2. Tyatyushkin A.I. Multimethod control optimization // Journal of Advanced Research in Natural Science. 2022. – №16. P. 4–14.
3. Евтушенко Ю.Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. Серия «Оптимизация и исследование операций» под ред. Н.Н. Моисеева. М.: Наука, 1982. 432 с.

ОСОБЕННОСТИ ПРОПОЗИЦИОНАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ ЗАДАЧИ ОБРАЩЕНИЯ ХЕШ-ФУНКЦИИ MD4

И. А. Грибанова
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
the42dimension@gmail.com

Криптографическая хеш-функция MD4 – одна из первых криптографических хеш-функций, получивших широкое распространение в различных протоколах. Несмотря на то что данная хеш-функция не является стойкой к атакам поиска коллизий, она всё ещё остаётся стойкой к атакам поиска прообраза. Это означает, что для данной хеш-функции задача поиска входного сообщения (прообраза) по заданному значению функции (хеш-значение) является вычислительно сложной.

Хеш-функция MD4 построена на базе конструкции Меркла-Дамгарда, в рамках которой входное сообщение (которое может иметь произвольную длину) разбивается на последовательность блоков длиной 512 бит, к каждому из которых применяется специальная функция сжатия f_{MD4}. Результат такой итеративной процедуры после обработки всех блоков сообщений – 128-битное хеш-значение. Алгоритм функции сжатия состоит из 48 шагов на каждом из которых происходит вычисление одной из переменной сцепления, используя информацию с предыдущих шагов. Переменные сцепления это 32-битные переменные, которые вместе формируют хеш-регистр, в котором хранится промежуточное значение хеш-функции.

Первой успешной атакой на неполнораундовую версию функцию сжатия f_{MD4}, состоящую из 32 шагов, считается атака Доббертина [1], предложенная в 1998 г. В рамках данной атаки было введено понятие дополнительных ограничений на промежуточные значения хеш-функции. Стоит отметить, что такие ограничения играют ключевую роль в криптоанализе хеш-функции MD4 поскольку их использование приводит к существенному сокращению пространства поиска, и, как следствие, к быстрому разрешению уравнений криптоанализа. В работе [2] были представлены новые варианты дополнительных ограничений позволяющие за реалистичное время решать задачу обращения 39 шагов функции сжатия MD4 на обычном ПК.

В настоящем докладе задача обращения f_{MD4} рассматривается с точки зрения SAT подхода, в рамках которого исходная задача криптоанализа сводится к задаче о булевой выполнимости, а именно к задаче о выполнимости булевой формулы в форме КНФ. Для построения КНФ используется система пропорционального кодирования Transalg [3]. В докладе будут предложены новые варианты пропозициональных кодировок для функции сжатия MD4, учитывающие информацию о дополнительных ограничениях.

1. Dobbertin H. The first two rounds of MD4 are not one way // In Fast Software Encryption 1998. LNCS, V. 1372. P. 284–292.
2. Gribanova I., Semenov A. Using automatic generation of relaxation constraints to improve the preimage attack on 39-step MD4 // In Proc. Of MIPRO 2018. P. 1174–1179.
3. Semenov A., Otpuschennikov I., Gribanova I., Zaikin O., Kochemazov S. Translation of Algorithmic Descriptions of Discrete Functions to SAT with Applications to Cryptanalysis Problems // Logical Methods in Computer Science. 2020. V. 16. Iss. 1. P. 29:1–29:42.

ОБ АЛГОРИТМЕ ЛОКАЛЬНОГО ПОИСКА В ЗАДАЧЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ K-MEANS*

М. С. Груздева, Т. В. Груздева
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
masha.gruzdeva2016@ya.ru, gruzdeva@icc.ru

Оптимизационная задача о k-средних (k-means) является одной из базовых математических моделей кластерного анализа, а хорошо известные алгоритмы ее решения k-means и k-means++ [1] широко применяются в различных областях, включая биоинформатику, обработку изображений и анализ больших данных. Эти алгоритмы являются алгоритмами локального поиска и не могут гарантировать глобально оптимального разбиения данных на кластеры.

В работе рассматривается задача минимизации суммы квадратов евклидовых расстояний между элементами данных $a^j, j = 1, \dots, m$, и центрами соответствующих кластеров $y^i, i = 1, \dots, k$, которые необходимо найти:

$$\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \parallel y^i - a^j \parallel^2 \downarrow \min_{(x,y)}, \qquad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{k} x_{ij} = 1 \qquad \forall\, j = 1, \dots, m, \qquad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i = 1, \dots, k,\ \ j = 1, \dots, m \qquad (3)$$

Целевая функция (1) минимизирует ошибку кластеризации. Переменные x_{ij} отвечают за принадлежность элемента j к кластеру i: $x_{\mathrm{ij}} = 1$, если элемент данных j назначен кластеру i; $x_{\mathrm{ij}} = 0$, в противном случае, $i = 1, \dots, k,\ \ j = 1, \dots, m$. Ограничения (2) гарантируют, что каждый элемент данных будет назначен ровно одному кластеру.

Поскольку элементы данных всегда назначаются кластеру с ближайшим центром, для фиксированных y^i переменные x_{ij} принимают значения 0 или 1 в соответствующем оптимальном решении, и можно рассматривать естественное ослабление ограничений (3), заменив их на непрерывные:

$$x_{ij} \in [0,1] \qquad \forall\, i = 1, \dots, k,\ \ j = 1, \dots, m \qquad (4)$$

А возможность представления целевой функции посредством разности выпуклых функций позволяет рассматривать задачу (1), (2), (4) как непрерывную задачу DC оптимизации [2]:

$$f(x,y) = g(x,y) - h(x) \downarrow \min, \quad x \in S, \qquad y \in R^{k \times n}, \qquad (DC)$$

где

$$g(x,y) = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m} [d_1 \parallel y^i - a^j \parallel^2 + d_2 x_{ij}^2], \qquad (5)$$

$$h(x) = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m} [d_1 \parallel y^i - a^j \parallel^2 + d_2 x_{ij}^2 - x_{ij} \parallel y^i - a^j \parallel^2] \qquad (6)$$

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 25-21-00304

– выпуклые с некоторыми константами $d_1 > 1, d_2 > 0$ функции [2],

$$S = \left\{ x_{ij} \in [0,1] : \sum_{i=1}^{k} x_{ij} = 1,\ i = 1, \dots, k,\ j = 1, \dots, m \right\}.$$

Метод локального поиска в задаче (DC) основан на решении серии ($s = 0,1,2, \dots$) линеаризованных (в точке (x^s, y^s)) задач [3]

$$g(x,y) - \langle \nabla h(x^s, y^s), (x,y) \rangle \downarrow \min, \quad x \in S, \quad y \in R^{k \times n}, \qquad (LDC)$$

которые оказываются сепарабельными по каждой группе переменных, если использовать DC представление (5)-(6).

Свойство сепарабельности задачи позволяет разработать эффективный метод решения, в котором компонента y вычисляется аналитически: $y^{(s+1)i} = y^{si} + \Delta y^{si}$, где

$$\Delta y^{si} = \frac{1}{m d_1} \sum_{j=1}^{m} (a^j - y^{si}) x_{ij}^s],\ \ i = 1, \dots, k,$$

а поиск компоненты x решения задачи (LDC) производится за конечное число шагов быстрым алгоритмом, разработанным в [4].

Вычислительные эксперименты на наборах данных, сгенерированных на основе распределения Гаусса [5] и широко используемых при тестировании алгоритмов кластеризации, показали эффективность разработанного алгоритма, который обеспечивает более низкие значения функции ошибки и лучшие внешние метрики кластеризации по сравнению с классическим алгоритмом Ллойда (k-means) и его модификацией (k-means++).

1. Jain, A. K.: Data clustering: 50 years beyond k-means. Pattern Recognit. Lett. 2010. V. 31(8), pp. 651-666.
2. Gruzdeva, T.V., Ushakov, A.V.: On a nonconvex distance-based clustering problem. Lecture Notes in Computer Science. 2022, V. 13367, pp. 139-152.
3. Strekalovsky, A.S.: On local search in d.c. optimization problems. Appl. Math. Comput. 2015. V. 255, pp. 73-83.
4. Kuznetsova, A.A., Strekalovsky, A.S.: On solving the maximum clique problem. J. Global Optim. 2001, V. 21, pp. 265-288.
5. Zhang, T., Ramakrishnan, R., Livny, M.: Birch: a new data clustering algorithm and its applications. Data Min. Knowl. Discov. 1997. V. 1(2), pp. 141–182.

ЛОГИЧЕСКАЯ СРЕДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

А. В. Давыдов, Н. В. Нагул, Е. А. Черкашин
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
artem@icc.ru, sapling@icc.ru, eugeneai@icc.ru

В докладе представлены основные принципы, лежащие в основе создаваемой логической среды для решения задач, возникающих при использовании групп автономных мобильных роботов (далее – АМР). Как известно, на сегодняшний день именно группы роботов являются наиболее эффективным инструментом для мониторинга, исследования, патрулирования и решения других комплексных задач на земле, в воздухе и в подводной среде. В [1] была предложена модель иерархического управления группами АМР, ядром которой является логическая дискретно-событийная система (далее – ДСС). Для управления самой ДСС используется теория супервизорного управления (далее – ТСУ), позволяющая контролировать поведение системы путем ограничения возможности возникновения некоторых возможных событий. На сегодняшний день ТСУ нашла применение для решения различных задач робототехники, включая планирование действий, групповое и роевое управление [2-4]. Несмотря на свою эффективность, традиционные методы ТСУ могут требовать больших вычислительных затрат и не всегда интегрированы с возможностями символьной обработки данных. В связи с этим предлагается создать единую логическую среду, в которой будут совмещены функционал ТСУ и возможности символьной обработки данных на основе оригинального первопорядкового исчисления позитивно-образованных формул (далее – ПОФ). В отличие от логики, основанной на хорновских дизъюнктах, исчисление ПОФ позволяет выводить нехорновские формулы, что значительно повышает возможность решения сложных задач управления и планирования. Такой подход позволяет проверять свойства системы и синтезировать планы действий с помощью логического вывода непосредственно в процессе обработки событий, что позволит, среди прочего, находить решение для задачи построения оптимального супервизорного управления.

Разрабатываемая среда будет состоять из нескольких компонентов, одним из которых станет специальный предметно-ориентированный язык (DSL). DSL предоставляет удобную высокоуровневую абстракцию для описания компонентов системы, взаимосвязей между ними и возможных ограничений. Описания на DSL могут автоматически транслироваться в математические формализмы, в нашем случае, в формализм ПОФ. Дополнительным преимуществом этого подхода является его совместимость с современными инструментами искусственного интеллекта, такими как большие языковые модели (LLM), которые могут помочь в решении промежуточных задач, определяемых в рамках DSL.

1. Bychkov I., Ul'yanov S., Nagul N., Davydov A., Kenzin M., and Maksimkin N. Event-based cooperative control framework for robot teams // in «Robotics and Rehabilitation Intelligence», J. Qian, J. Liu, J. Cao, and D. Zhou, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2020. P. 121–137.
2. Dai X., Jiang L., and Zhao Y. Cooperative exploration based on supervisory control of multi-robot systems // Appl. Intell. 2016. Vol. 45, no. 1. P. 18–29.
3. Lopes Y.K., Trenkwalder S.M., Leal A.B., Dodd T.J., and Groß R. Supervisory control theory applied to swarm robotics // Swarm Intell. 2016. Vol. 10, no. 1. P. 65–97.
4. Karpas E., Magazzeni D. Automated planning for robotics // Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst. 2020. Vol. 3. P. 417–439.

СВОЙСТВА РЕШЕНИЙ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ И РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ В ЛИНЕЙНЫХ ЧЛЕНАХ*

Г. В. Демиденко
Институт математики имени С. Л. Соболева СО РАН
demidenk@math.nsc.ru

В работе рассматриваются системы нелинейных дифференциальных уравнений

$$\frac{dy}{dt} = A(t)y + f(t,y), \quad -\infty < t < \infty, \qquad (1)$$

и системы нелинейных разностных уравнений

$$x_{n+1} = B(n)x_n + g(n,x_n), \quad n \in Z = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}. \qquad (2)$$

Элементы $(m \times m)$-матриц $A(t)$ являются непрерывными – периодическими функциями, т. е.

$$A(t+T) \equiv A(t), \quad t \in R,$$

и матричная последовательность $\{B(n)\}$ имеет период N, т. е.

$$B(n+N) \equiv B(n), \quad n \in Z.$$

Предполагается, что однородные системы (1), (2) экспоненциально дихотомичны (см., например, [1-3]).

В работах [4-6] были установлены: критерий экспоненциальной дихотомии для систем вида (1) в терминах разрешимости специальных краевых задач для дифференциального уравнения Ляпунова

$$\frac{d}{dt}H + HA(t) + A^*(t)H = F(t), \quad 0 < t < T,$$

а также критерий экспоненциальной дихотомии для систем вида (2) в терминах разрешимости некоторых краевых задач для системы разностных уравнений Ляпунова

$$V(l) - B^*(l)V(l+1)B(l) = G(l), \quad l = 0,1,\dots,N-1.$$

Установленные в [4-6] критерии отличаются от классических спектральных критериев экспоненциальной дихотомии.

Наша цель – на основе новых критериев экспоненциальной дихотомии исследовать асимптотические свойства решений систем вида (1) и (2), получить

* Работа выполнена в рамках государственного задания Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН (проект № FWNF-2022-0008).

оценки их решений, а также установить условия существования периодических решений (см., например, [7-9]).

1. Далецкий Ю.Л., Крейн М.Г. Устойчивость решений дифференциальных уравнений в банаховых пространствах. М.: Наука, 1970.
2. Годунов С.К. Современные аспекты линейной алгебры. Новосибирск: Научная книга, 1997.
3. Bulgak A., Bulgak H. Linear algebra. Konya: Selcuk University, 2001.
4. Demidenko G.V. Stability of solutions to difference equations with periodic coefficients in linear terms // J. Comput. Math. Optim. 2010. V. 6, No. 1. P. 1-12.
5. Demidenko G.V. On conditions for exponential dichotomy of systems of linear differential equations with periodic coefficients // Int. J. Dynamical Systems and Differential Equations. 2016. V. 6, No. 1. P. 63-74.
6. Демиденко Г.В., Бондарь А.А. Экспоненциальная дихотомия систем линейных разностных уравнений с периодическими коэффициентами // Сиб. мат. журн. 2016. Т. 57, № 6. С. 1240-1254.
7. Демиденко Г.В. Об одном классе систем дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами в линейных членах // Сиб. мат. журн. 2021. Т. 62, № 5. С. 995-1012.
8. Демиденко Г.В., Бондарь А.А., Ганжаева М.Ш. Экспоненциальная дихотомия систем линейных разностных уравнений при возмущении коэффициентов // Челябинский физ.-мат. журн. 2024. Т. 9, вып. 4. С. 561-572.
9. Demidenko G.V., Dulepova A.V. On periodic solutions of one second-order differential equation // Journal of Mathematical Sciences (United States). 2024. V. 278, No. 2. P. 314-327.

МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ «ПОРТРЕТ» ГОРОДА*

А. А. Добрынина [1, 2], С. А. Король [1], В. А. Саньков [1, 2], В. В. Чечельницкий [1], Е. В. Брыжак [1]
[1] Институт земной коры СО РАН,
[2] Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
dobrynina@crust.irk.ru

В работе рассматриваются вариации микросейсмических шумов, зарегистрированных в городских условиях. Микросеймические шумы – важное природное явление, которое влияет на записи сейсмических событий (взрывов, землетрясений и пр.) и несет информацию о состоянии недр Земли, ее строении, вариациях тектонических напряжений в зонах разломов и процессах подготовки сильных землетрясений, а также о прохождении опасных экзогенных процессов. Микросейсмический шум регистрируется в любой точке Земного шара и складывается из природных и техногенных шумов. В целом, по происхождению микросейсмы можно разделить на экзогенные (связанные с внешними источниками: приливные эффекты, ветер, деятельность человека) и эндогенные (обусловленные внутренними источниками: смещением блоков горных пород, процессами образования трещин в геологической среде, изменением структур за счет тектонических сил и деформирующих воздействий). В настоящей работе изучены проявления деятельности человека в микросейсмических полях на примере городов Иркутск и Байкальск.

В г. Иркутске расположены Иркутская гидроэлектростанция (ГЭС), Ново-Иркутская теплоэлектроцентраль (ТЭЦ), многочисленные автотранспортные дороги, через г. Байкальск проходит трасса Восточно-Сибирской железной дороги. Для анализа микросейсмических шумов в г. Иркутск использовались записи сейсмической станции Иркутск (принадлежит Байкальскому филиалу Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН») и сеть локальных станций Института земной коры СО РАН, расположенных в разных частях города (3 станции), в г. Байкальск – две временные станции Института земной коры СО РАН, расположенные вдоль русла р. Солзан.

Ново-Иркутская ТЭЦ расположена в юго-западной части города, часть пара после прохождения турбины направляется на нагрев воды, остальной пар после турбин направляется в конденсатор, а затем в градирни. Выход пара из градирен сопровождается звуковыми эффектами, слышными на расстоянии нескольких километров. Для анализа был выбран выброс пара 11 марта 2025 г. в 23 часа 45 минут (время местное), хорошо слышимый на расстоянии ~ 4.6 км. Анализ сейсмических записей показал значительное увеличение амплитуд вертикальных каналов в полосе частот от 4 до 18 Гц с максимумом на частотах 10–16 Гц (максимальное увеличение амплитуды наблюдалось на станции Иркутск – в 7 раз относительно фона). Этот эффект наблюдался для всех станций, расположенных на расстояниях от 3 до 9.5 км. Проведенные расчеты показали увеличение звука на 16 дБ на частотах 10–16 Гц. Это изменение можно охарактеризовать как значительное, так как 10 дБ уже

*Работа поддержана Крупным проектом Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»), проект 075-15-2024-533.

соответствуют переходу от тихих звуков к умеренно громким, а 16 дБ, соответственно, будут более заметным увеличением.

Иркутская ГЭС расположена на реке Ангаре в Свердловском районе г. Иркутск и является первой ступенью Ангарского каскада. Сооружения станции включают в себя две земляные плотины и здание ГЭС, совмещённое с донными водосбросами. Земляные плотины насыпные из песчано-гравийного грунта, с противофильтрационным ядром из суглинка. Правобережная плотина длиной 2148 м и максимальной высотой 43 м по своим конструктивным особенностям условно разделяется на островную, русловую и правобережную части. Левобережная плотина имеет длину 328 м и максимальную высоту 38.5 м. Здание ГЭС руслового типа, совмещено с донными водосбросами. В здании установлены 8 гидроагрегатов, оборудованных поворотно-лопастными турбинами, работающими при расчётном напоре 26 м. Между гидроагрегатами размещены 16 донных водосбросных водоводов общей пропускной способностью 3840 м3/с. С учётом пропуска воды через гидроагрегаты максимальная пропускная способность гидроузла достигает 7040 м3/с, при этом сбросы выше 6000 м3/с не допускаются по условиям незатопления г. Иркутска. Нами анализировались сейсмические шумы, генерируемые обычным сбросом воды (12–21 мая 2025 г., сброс 1500–1600 м3/с) и во время увеличенного сброса: 9–18 августа 2021 г. (сброс до 3100–3300 м3/с), 15–24 июля 2024 г. (до 2400–2800 м3/с). Так как в верхней части плотины ГЭС проходит автомобильная дорога, соединяющая право- и левобережную части города, анализировались наименее зашумленные записи – в период с 18:00 до 20:00 (время UT). На спектрах, полученных станцией Иркутск, хорошо видны узкие высокоамплитудные пики на частоте ~1.4 Гц, соответствующей собственной частоте гидроагрегатов. При увеличенном сбросе воды наблюдается увеличение спектральной плотности мощности сейсмических шумов в частотном диапазоне от 0.1 до 40 Гц, максимум приходится на полосу высоких частот – от 1 до 20 Гц, при этом наибольшее увеличение наблюдается для горизонтальных каналов. Максимальное увеличение сейсмического шума отмечается 12 августа 2021 г. в период максимального сброса воды – 3300 м3/с, амплитуды при этом увеличились в 23 раза относительно фона (на частоте 3 Гц). Также построена зависимость амплитуд сейсмических шумов в зависимости от уровня водохранилища – для канала NS амплитуды скоростей увеличились в 1.88, EW – в 1.98, Z – в 1.65 раз, при этом подъем уровня водохранилища составил 0.85 м.

В 2020 г. во время пандемии с 20 часов (время местное) 31 марта до 5 апреля включительно Иркутская область перешла на режим самоизоляции, в связи с чем в городе значительно упала транспортная нагрузка. Нами были проанализированы записи станции Иркутск за периоды с 23 по 31 марта (до изоляции) и с 01 по 06 апреля (во время изоляции). Отдельно анализировались записи, полученные в рабочие дни и в выходные (суббота, воскресенье). Полученные результаты свидетельствуют о том, что уровень сейсмических шумов стабильно снижается в выходные дни в ~1.3 раза относительно рабочих вне зависимости от режима самоизоляции, в то время как уровень шума в рабочие дни в обычном режиме превышает уровень шума в период самоизоляции в 1.13 раз, а в выходные – в 1.09 раз. Максимальное понижение уровня шума отмечается на частотах 4–15 Гц.

Сейсмическая станция Иркутск расположена в здании Института земной коры СО РАН на расстоянии 86 м от улицы Лермонтова, одной и главных транспортных линий города, на расстояниях 76 и 67 м проходят еще две улицы. Анализ спектрально-временных диаграмм в ночное и дневное время (минимальная и максимальная транспортная нагрузки соответственно) показал увеличение

спектральной плотности мощности сейсмического шума в дневное время в частотном диапазоне от 5 до 15 Гц. Максимальное увеличение в 140 раз относительно спокойного фона наблюдается для вертикальной компоненты.

Сейсмические станции в г. Байкальск были расположены на расстояниях 71 и 1193 м от линии Восточно-Сибирской железной дороги. По дороге проходят пригородные поезда, поезда дальнего следования, а также грузовые (товарные) поезда. В отличие от других сейсмических помех антропогенного происхождения, проанализированных в настоящей работе, сейсмические записи, сгенерированные проходящими поездами, легко выделяются визуально и имеют характерную узнаваемую форму. Длительность записи зависит от длины состава и может составлять до 2 минут для пригородного поезда, до 5 минут для поезда дальнего следования и более – для грузового состава. Амплитуды сейсмических шумов увеличиваются в области от 5 до 30 Гц с максимумом в области 20–25 Гц. Максимальное увеличение амплитуд сейсмического шума наблюдается для горизонтальных компонент, их значения зависят от скорости и тяжести состава и могут достигать 83 для пригородных поездов и 200 и более для грузовых составов и поездов дальнего следования от уровня спокойного фона.

По итогам выполненного исследования можно заключить, что антропогенная деятельность в пределах населенных пунктов находит свое отражение в изменении микросейсмического поля. При этом, каждое антропогенное воздействие (транспортная нагрузка, уровень воды в водохранилище, увеличение сброса воды на плотине ГЭС, сброс пара на ТЭЦ) имеет собственные характерные частоты излучения и может быть уверенно идентифицировано с помощью спектрального и спектрально-временного анализа. Знание об амплитудно-частотных характеристиках антропогенных шумов и их вариациях необходимо при изучении спектральных свойств сейсмического шума природного эндогенного и экзогенного происхождения, чтобы избежать «загрязнения» полезного сигнала.

РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ АВИАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ*

Н. О. Дородных, О. А. Николайчук, А. Б. Столбов, А. Ю. Юрин
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
iskander@icc.ru

В настоящее время эффективное решение задач технической диагностики в гражданской авиации труднодостижимо без применения специализированного программного обеспечения. Подобные системы в форме электронных руководств и экспериментальных интеллектуальных систем (AirNav-Maintenance, MyBoeing Fleet, ReleaseCMS, ЭСАНА и др.) позволяют оперативно получать релевантную информацию о причинах неисправностей и способах их устранения, зафиксированную в нормативной документации. Однако большинство подобных систем обладает рядом недостатков, совокупность которых приводит к проблеме повышения эффективности создания диагностического программного обеспечения, в том числе, реализующего классические методы искусственного интеллекта.

Данный цикл работ является продолжением исследований, направленных на создание, развитие и применение оригинальной технологии построения декларативных баз знаний интеллектуальных систем на основе модельных трансформаций. Рассмотрение авиационной диагностики в качестве новой предметной области потребовало расширения технологии как в части поддержки новых графических формализмов представления предметных знаний, так и целевых платформ. В частности:

– в контексте решаемой задачи основными способами визуального моделирования сценариев работ являлись онтологические шаблоны [4], а также диаграммы деревьев событий и переходов состояний [2, 5, 7, 10];

– для поддержки способов моделирования был разработан инструментарий – веб-ориентированная программная система Knowledge Modeling System [6, 17];

– специализированные таблицы решений были рассмотрены в качестве основного способа представления и хранения знаний о ключевых понятиях предметной области (неисправностях, их внешних проявлениях в форме различных сигналов и признаков, работ по локализации и устранению неисправностей) и их взаимосвязях [3, 15, 16];

– реализована проблемно-ориентированная программная платформа АвиаТехПом (авиационный технический помощник) [9] с мультиплатформенной клиентской частью – доступ к данным и знаниям системы возможен посредством веб [18, 19] и настольного приложений [22], а также виртуального ассистента [1, 13, 14, 20];

– отработка алгоритмического и программного обеспечения осуществляется на примере систем самолетов Сухой Суперджет (RRJ-95) и Cessna (182T). Отдельные модули [21] внедрены в учебный процесс Иркутского филиала Московского государственного университета гражданской авиации и проходят опытную эксплуатацию в АК ИрАэро [8].

* Представленные работы опубликованы по результатам госзадания Минобрнауки России по проекту 121030500071-2, грантов РНФ 22-21-00099 и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе СТАРТ-ИИ (207ГС1ИИС12-D7/85752).

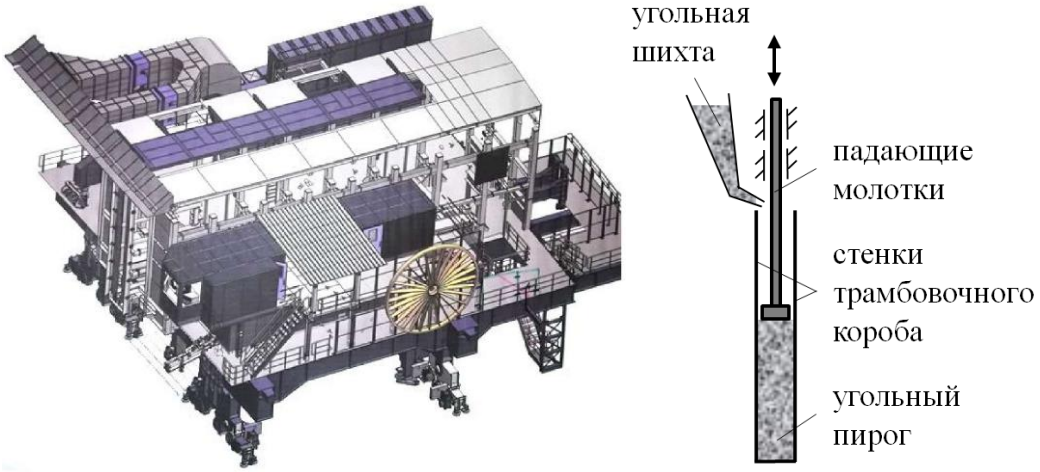
1. Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Stolbov A.B., Yurin A.Yu. Creating Virtual Assistants Based on Model Transformations // Pattern Recognition and Image Analysis, 2024, Vol. 34, No. 3, pp. 692–701. DOI: 10.1134/S1054661824700548
2. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Котлов Ю.В., Юрин А.Ю. О подходе к построению баз знаний для задач авиационной диагностики // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2025. №1. С.131-139. [Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Kotlov Yu.V., Yurin A.Yu. An Approach to Building Knowledge Bases for Aviation Diagnostics Tasks // Russian Aeronautics, 2025, Vol. 68, No. 1, P. 146–154. DOI: 10.3103/S1068799825010167]
3. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Котлов Ю.В., Юрин А.Ю. Создание диагностических систем поддержки принятия решений с использованием таблиц решений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2025. №3. С. 15-29. DOI: 10.14357/20718594250302
4. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Использование онтологических шаблонов содержания при построении баз знаний для технического обслуживания и ремонта авиационной техники // Онтология проектирования. 2022. Т.12. №2. С.158-171. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-158-171
5. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Использование диаграмм переходов состояний для автоматизированного создания баз знаний // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2024. №2(34). С.69-81. DOI: 10.25729/ESI.2024.34.2.007
6. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Программная реализация алгоритмов для создания прототипов баз знаний на основе визуального моделирования и трансформаций // Программные продукты и системы. 2024. №3. С. 324-333. DOI: 10.15827/0236-235X.147.324-333
7. Котлов Ю.В., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Использование деревьев событий при автоматизации и интеллектуализации диагностирования и ремонта авиационной техники // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. №4. С.222-228. [Kotlov Yu.V., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu. Using the Event Trees in the Automation and Intellectualization of Aircraft Diagnostics and Repair // Russian Aeronautics, 2023, Vol. 66, No. 4, P. 902–909. DOI: 10.3103/S1068799823040323]
8. Утехин С.Ю., Юрин А.Ю. Применение программно-алгоритмического обеспечения «АвиаТехПом» при решении задач ремонта и технического обслуживания воздушных судов // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2024. № 4. С. 116-126. DOI: 10.51955/2312-1327_2024_4_116
9. Юрин А.Ю., Котлов Ю.В. АвиаТехПом: Состояние и перспективы // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2024. № 1. С. 146-156. DOI: 10.51955/2312-1327_2024_1_146
10. Yurin A.Yu., Dorodnykh N.O., Kotlov Yu.V., Kivokurtsev A.L. Visual Designing Knowledge Bases for Aircraft Diagnostics Using State Transition Diagrams // 2024 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), 2024, P. 27-30. DOI: 10.1109/USBEREIT61901.2024.10584057
11. Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Using State Transition Diagrams for Automated Knowledge Base Construction // Lecture Notes in Networks and Systems, 2024, Vol. 1209, P. 21-32. DOI: 10.1007/978-3-031-77688-5_3
12. Yurin A.Yu., Nikolaychuk O.A., Dorodnykh N.O., Stolbov A.B., Kotlov Y.V., Popov V.M. Knowledge Bases Engineering Based on Event Trees Transformations: A Case Study for Aircraft Diagnostics // Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, Vol. 566, P. 3-12. DOI: 10.1007/978-3-031-19620-1_1
13. Dorodnykh N.O., Stolbov A.B., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu. An Intelligent Assistant for Decision Support in the Case of Aircraft Troubleshooting // Proceedings of IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), 2023, P. 1–5. DOI: 10.1109/ITNT57377.2023.10139242
14. Yurin A.Yu., Nikolaychuk O.A., Dorodnykh N.O., Stolbov A.B., Denisova D.A. Using an Intelligent Assistant for Aircraft Diagnostics and Maintenance // Lecture Notes in Networks and Systems, 2023, Vol. 776, P. 325-333. DOI: 10.1007/978-3-031-43789-2_30

15. Yurin A.Yu., Nikolaychuk O.A., Dorodnykh N.O., Kotlov Yu.V. A Technique for Rapid Development of Declarative Knowledge Bases for Aircraft Diagnostics Based on Decision Tables // Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, 502, P. 140-149. DOI:10.1007/978-3-031-09076-9_13
16. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Проблемно-ориентированная среда для создания систем поддержки принятия решений на основе таблиц решений // Материалы VII Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2025), 7-11 июля, 2025, Иркутск, Россия. Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2025. С.91-96. DOI: 10.47350/ICCS-DE.2025.11
17. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Система визуального моделирования знаний Knowledge Modeling System // Proceedings of the 6th International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2024), July 01–05, 2024, Irkutsk, Russia. С. 97-102. DOI: 10.47350/ICCS-DE.2024.13
18. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. АвиаТехПом.Репозиторий // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. М. Рег. № 2024612775 от 05.02.24.
19. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Сопп Д.Ю., Юрин А.Ю. АвиаТехПом.Сервис // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. М. Рег. № 2024663759 от 11.06.24.
20. Юрин А.Ю. АвиаТехПом.Ассистент // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. М. Рег. № 2025616049 от 13.03.25.
21. Юрин А.Ю. АвиаТехПом.ДампАнализатор // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. М. Рег. № 2024668899 от 27.08.24.
22. Юрин А.Ю. АвиаТехПом.Терминал // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. М. Рег. № 2024615812 от 13.03.24.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТРАМБОВАНИЯ УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ

С. В. Доронин, Ю. Ф. Филиппова
Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
sdoronin@ict.nsc.ru, filippovajf@ict.nsc.ru

Подготовка угольной шихты к коксованию путем трамбования в специальных технических объектах – трамбовочном коробе в составе загрузочной машины (рисунок 1, а) – является одним из способов повышения эффективности производства кокса. Технологический процесс трамбования предполагает постоянную подачу шихты в рабочее пространство короба и ее уплотнение свободно падающими с определенной частотой молотками (рисунок 1, б). В процессе трамбования получается плотный и прочный угольный пирог. По мере достижения требуемых высоты и объема пирога он выталкивается кареткой в камеру коксовой печи.



(а) (б)

Рисунок 1. Общий вид загрузочной машины (а) и схема работы трамбовочного короба (б)

Идеи, положенные в основу рассматриваемой технологии, опубликованы более четырех десятилетий назад. Ее промышленное применение известно в течение более трех десятилетий. Однако и до настоящего времени выбор параметров технологического процесса и характеристик оборудования является преимущественно эмпирическим, возможности и аналитических, и численных расчетов весьма ограничены. Это приводит к тому, что на практике не всегда удается достичь как требуемых характеристик прочности и плотности пирога (он разваливается в процессе выгрузки из короба), так и рациональных жесткостных характеристик конструкции короба (в процессе трамбования наблюдаются повышенные деформации и вибрации). На наш взгляд, в первую очередь это обусловлено весьма сложным комплексом взаимодействующих и влияющих друг на друга физико-технических факторов эффектов в массиве шихты и конструкции короба, а также изменчивостью свойств шихты. Взаимосвязи и взаимовлияние этих факторов и эффектов представлены графом знаний, являющимся концептуальной моделью процесса трамбования (рисунок 2). С учетом сложности взаимосвязей и

взаимовлияний представляется целесообразным отдать предпочтение численным, а не аналитическим, методам анализа.

Потребности практики, которые можно рассматривать в качестве прикладных целей исследования процесса трамбования, заключаются в необходимости понимать и количественно описать, что происходит с массивом шихты для управления свойствами трамбованного пирога, и с коробом для расчетного анализа его прочности и долговечности.

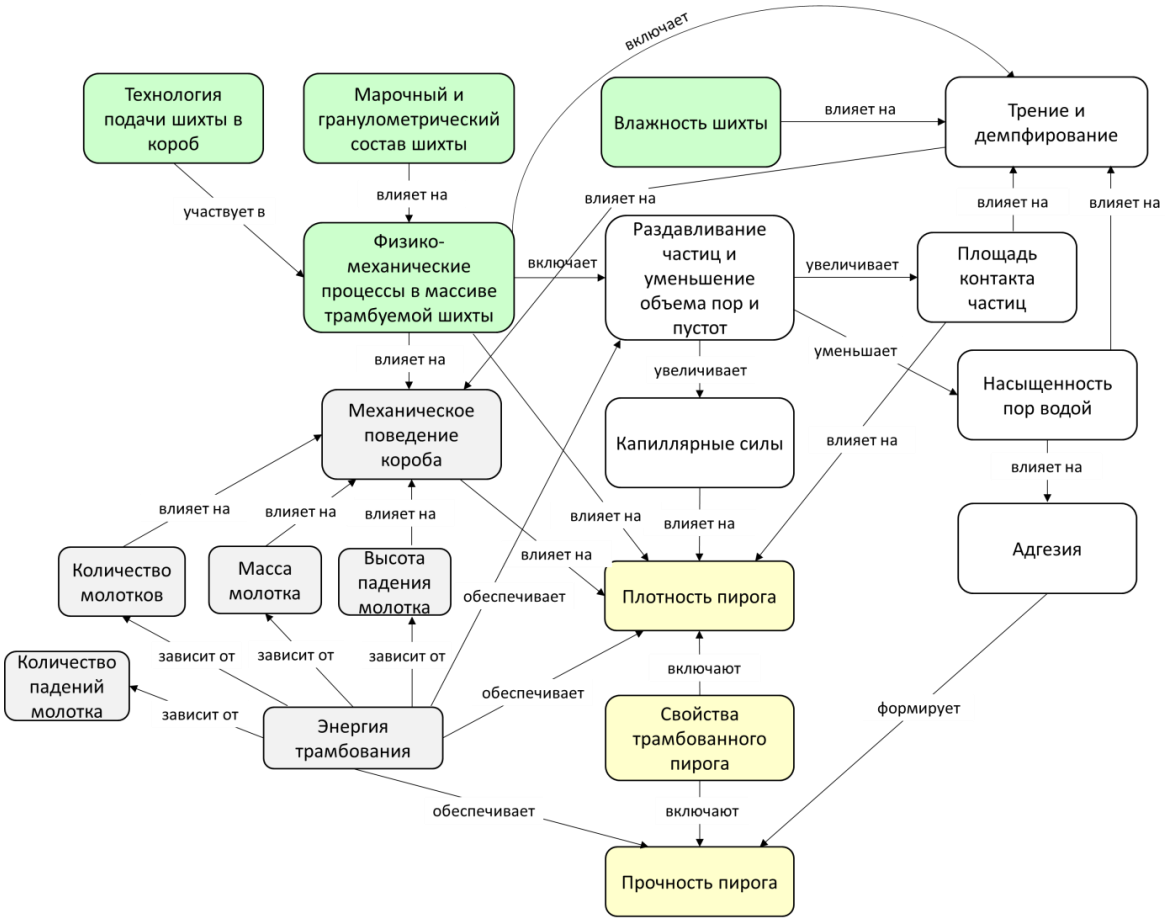


Рисунок 2. Граф знаний – отражение концептуальной модели процесса трамбования

Исходя из указанных прикладных целей представляется целесообразным рассматривать два типа численных моделей. Для изучения процессов в массиве трамбуемой шихты с учетом всех ее особенностей необходимо использование метода дискретных элементов (реализованного, например, в среде пакета Rocky DEM). Для анализа механического поведения короба предположительно достаточно представления массива шихты сплошной средой и использования метода конечных элементов. В настоящей работе рассматривается опыт разработки и исследования численной модели второго типа в связи с имеющимися экспериментальными данными, полученными в реальных производственных условиях.

Исходные данные для разработки модели:

– расчетные значения модулей деформации для различных состояний грунта (опубликованные экспериментальные данные Хархуты Н.Я.);

– коэффициенты демпфирования грунтов и сыпучих сред (опубликованные экспериментальные данные Ashmawy A.K. et al., Kallioglou P. et al., Mog K. et al., Presti D.C.F Lo et al.);

– характеристики поведения пирога при одиночном падении молотка с высоты 0,4 м: прогиб шихты 28 мм (опубликованные экспериментальные данные Wang J. et al.);

– геометрические параметры молотка, короба, пирога, высота падения молотка в процессе трамбования (0,7 м).

С учетом этих данных на основании анализа структуры, связей и взаимодействия элементов механической системы определены следующие особенностия модели взаимодействия одиночного молотка, пирога и короба (рис. 3):

– модель представлена тремя изотропными твердотельными объектами (молотком, стенками короба, пирогом) с контактным взаимодействием между молотком и пирогом (без трения), пирогом и стенками (с коэффициентом трения f);

– используются две плоскости симметрии;

– пирог по высоте содержит три слоя с индивидуальными характеристиками жесткости;

– для материала пирога задан относительный коэффициент демпфирования 0,08.

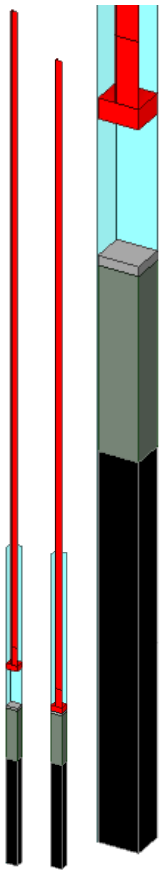


Рисунок 3. Общий вид геометрической модели

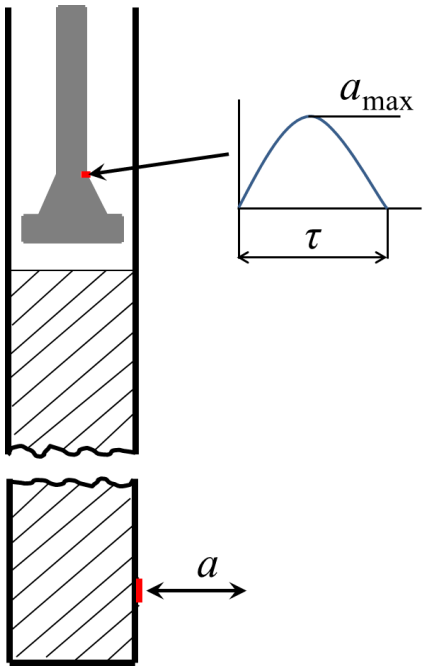


Рисунок 4. Зоны измерения экспериментальных значений виброускорений

Данные для идентификации динамической модели (рис. 4):

– характеристики ударного импульса в виде виброускорений в зоне соударения молотка и пирога – пиковые значения a_{max} = (5,5…24)g, продолжительность импульса τ = (27…66) мс (собственные экспериментальные данные);

– ускорения стенки короба в горизонтальной плоскости, в разных точках по длине короба достигающие $a = (0{,}83…1{,}22)g$ (собственные экспериментальные данные).

Идентификация модели заключалась в нахождении обобщенных характеристик жесткости (модулей Юнга) трех слоев пирога с целью обеспечения достаточно близкого (с точки зрения прикладных задач) соответствия расчетных и экспериментальных виброускорений.

Динамическая задача решалась в среде ANSYS Transient Structural. Моделировался временной интервал 0,15 с, в первой трети которого осуществлялось ударное взаимодействие молотка и пирога, в оставшееся время – свободные затухающие колебания механической системы.

В ходе многовариантных вычислительных экспериментов получены значения модулей Юнга слоев пирога (8 МПа для верхнего, 70 МПа для среднего и 100 МПа для нижнего слоев), обеспечившие расчетные значения ударного импульса $a_{\max} \approx 24g$ и $\tau = 43$ мс, расчетные виброускорения стенки короба в горизонтальной плоскости $a = (-1{,}2…0{,}92)g$. При этом максимальный расчетный прогиб шихты при высоте падения молотка 0,7 м составил 44 мм, что не противоречит данным Wang J. et al. (прогиб 28 мм при высоте падения молотка 0,4 м). Полученные результаты позволяют использовать разработанную динамическую модель для расчетного анализа механического поведения короба в процессе трамбования шихты.

ПРОГРАММА ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОГО РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПО ФОРМУЛАМ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРОЙ*

Я. А. Еделев
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН,
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
yarvaleev07@bk.ru

В настоящее время приложения для решения больших научных и прикладных задач в гетерогенной распределенной вычислительной среде (далее – ГРВС) зачастую используют научные рабочие процессы (далее – НРП), являющиеся в общем случае ярусно-параллельными формами графа алгоритма решения задачи [1]. Вершины графа представляют модули НРП, а дуги – передачу данных между ними.

При работе с приложением формируется поток заданий по выполнению модулей НРП. Предварительно может осуществляться виртуализация или контейнеризация программного обеспечения в узлах ГРВС. Задания поступают в очередь системы управления прохождением заданий (далее – СУПЗ), которая осуществляет их запуск, контроль статуса выполнения, обработку сбоев и отказов программно-аппаратных средств и т. п.

Важной научной проблемой является составление оптимального расписания выполнения модулей НРП с целью ускорения процесса решения задачи и эффективного использования ресурсов ГРВС. При построении подобного расписания одной из основных задач является оценка времени выполнения НРП.

Получение такой оценки для одного и того же НРП может зависеть от режима его выполнения (синхронного или асинхронного) и механизмов передачи данных между его модулями (через центральный узел или напрямую между узлами, на которых выполняются модули), а также учета накладных расходов разного рода (затраты времени на виртуализацию, контейнеризацию, ожидание в очереди СУПЗ, перезапуск в случае сбоев программно-аппаратных средств и другие события). Это приводит к многообразию математических формул расчета оценки.

Известные программные средства, как правило, ориентированы на предопределенную структуру формул (см., например, [2] и [3]). Поэтому возникает необходимость разработки программы оценки времени выполнения НРП, поддерживающей использование формул с изменяющейся структурой.

Работа посвящена разработке такой программы. Основными средствами для реализации программы являются язык программирования Python и инструментарий для математических расчетов GNU Octave [4]. Дополнительно, используются внешние библиотеки oct2py и jsonschema для Python и symbolic для GNU Octave. Блок-схема работы программы представлена на рис. 1. Процесс выполнения программы включает два основных этапа:

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» (рег. № 121032400051-9) и грант № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

1) *Проверка и интерпретация входных данных.* Программа устанавливает связь (запускает рабочую сессию) с математическим пакетом GNU Octave, используя библиотеку oct2py, и передает ему файл с расчетными формулами в символьном виде. GNU Octave интерпретирует полученный файл, используя библиотеку symbolic, и получает расчетные формулы и список переменных в символьном виде. Далее, программа загружает входные данные и проверяет их на соответствие полученным от пользователя метаданным, используя библиотеку jsonschema. При отсутствии ошибок, выполняется следующий этап.

2) *Расчет оценки времени выполнения НРП*. Программа получает от GNU Octave список символьных переменных и ставит им в соответствие значения входных данных. Символьные переменные выгружаются из рабочей сессии GNU Octave и заменяются конкретными значениями. Программа запускает расчет, запрашивает у GNU Octave значение времени выполнения НРП, завершает рабочую сессию, и, при отсутствии ошибок, возвращает файл с временем выполнения НРП.

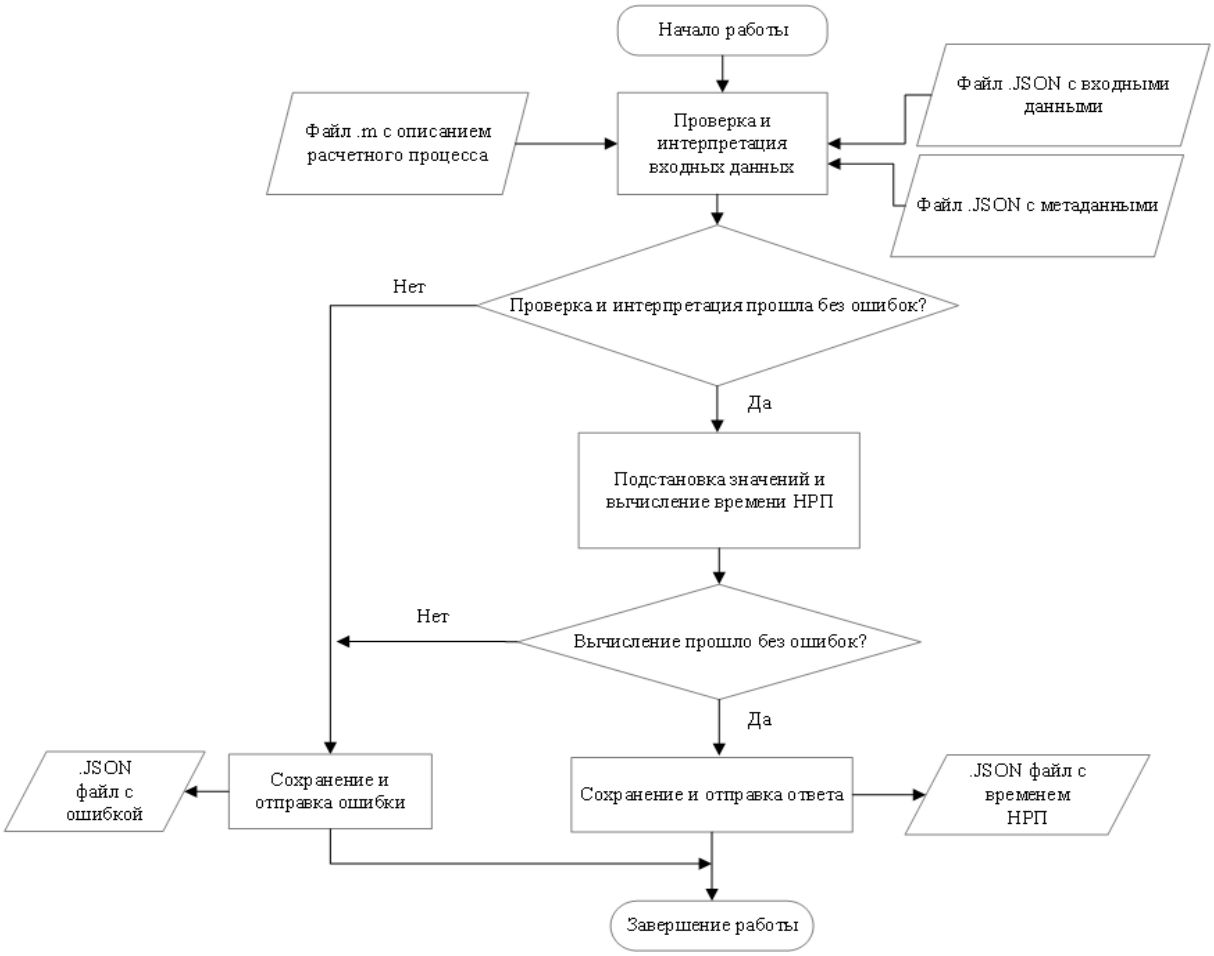


Рисунок 1. Блок-схема работы программы

Разработанная программа успешно используется диспетчером НРП инструментального комплекса FDE-SWFs при управлении вычислениями в ГРВС в рамках решения задач исследования состояния и развития природно-технических систем (локальных энергетических комплексов), расположенных на Байкальской природной территории [5].

Эксперименты подтвердили работоспособность программы и корректность ее результатов. Важным преимуществом программы в сравнении с известными программными средствами является возможность модификации формул для расчета оценки времени выполнения НРП.

1. Воеводин В.В., Вл.В. Воеводин. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ–Петербург, 2002. 608 с.
2. Bader J., Lehmann F., Thamsen L., Leser U., Kao O. Lotaru: Locally Predicting Workflow Task Runtimes for Resource Management on Heterogeneous Infrastructures // Future Generation Computer Systems. 2023. Vol. 150. P. 171–185.
3. HPC Run-Time Predictor Microservices. URL: https://github.com/c0mpiler/ hpc-runtime-prediction.
4. GNU Octave. URL: https://octave.org/.
5. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Воскобойников М.Л., Чекан М.А., Яковлев Д.С., Боднюк М.Е., Николаев Е.П., Юмашев Е.А., Еделев Я.А. Моделирование природно-технических систем: инструментальная поддержка // Материалы Выездного совещания участников проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», 27 августа 2025 г., г. Белокуриха, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2025. С. 22–26.

АНАЛИЗ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ COVID’19 ДЛЯ ДЕТЕЙ РАЗНЫХ ВОЗРАСТНЫХ КАТЕГОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ГУРМАНА-РОЗЕНРАУХА

Н. В. Ефимова[1], А. Ю. Горнов[2], Т. С. Зароднюк[2]
[1]ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований»
[2]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
medecolab@inbox.ru, tz@icc.ru

После пандемии COVID’19 накоплен внушительный объем данных по заболеваемости населения, позволивший сформировать базу для проведения исследований по анализу медицинский данных в этот период. На основе имеющегося опыта оценки наиболее влиятельных на заболеваемость факторов и ее прогнозирования для северных территорий и промышленных центров Иркутской области [1] с целью исследования особенностей заболеваемости в период пандемии была выбрана апробированная модель Гурмана-Розенрауха [2].

Для нахождения значений параметров модели сформулирована задача оптимизации вкладов наиболее значимых факторов (погодных условий – температуры воздуха и скорости ветра; социальных факторов – обеспеченности врачами и доступности общественного транспорта; плотности населения в исследуемых городах, а также показателя загрязненности атмосферного воздуха).

Предлагаемый подход основан на последовательном применении глобализующего алгоритма, основанного на выделении областей, содержащих экстремальные значения минимизируемой функции, с дальнейшим применением методов локальной оптимизации для более точного нахождения минимума в каждой из выделенных областей. Полученный набор оптимальных значений оптимизируемых параметров позволил оценить вклад каждого из выделенных факторов в формирование показателя заболеваемости детского населения в городах Иркутской области: г. Иркутск – 1, г. Ангарск – 2, г. Братск – 3, г. Саянск – 4, г. Шелехов – 5, г. Свирск – 6, г. Железногорск – 7, г. Усть-Кут – 8, г. Усть-Илимск – 9, г. Усолье-Сибирское – 10 (рис. 1).

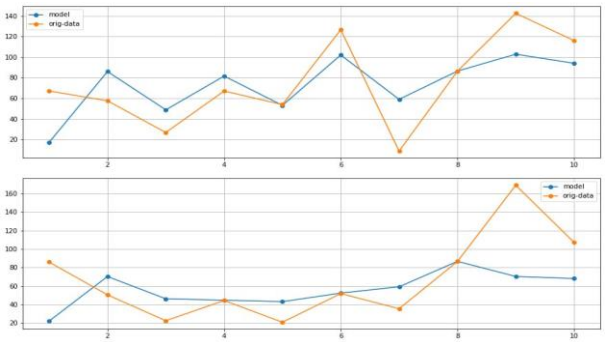


Рисунок 1. Результаты моделирования для детей до года и для подростков 15–18 лет: оранжевый график отражает показатели заболеваемости в рассматриваемых населенных пунктах, синий график построен с помощью модели Гурмана–Розенрауха.

Модель Гурмана–Розенрауха, аппроксимирующая доступные медицинские данные, накопленные в период пандемии COVID’19, позволяет оценить вклад

важных факторов в формирование заболеваемости и построить краткосрочные прогнозы с использованием возможных сценариев, предложенных экспертами.

1. Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S., Efimova N.V. Air pollution and population morbidity forecasting with artificial neural networks // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 211 (2018) 012053.
2. Efimova N.V., Bobkova E.V., Zarodnyuk T.S., Gornov A.Yu. Age trend in the mortality from diseases of the circulatory system during the pandemic under a decrease in air pollution // Gigiena i Sanitariya. 2024. Vol. 103, №9. P. 925–931.

О ПРИМЕНЕНИИ СЕТЕЙ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕВАЛКИ ГРУЗОВ В УНИВЕРСАЛЬНОМ МОРСКОМ ПОРТУ*

М. Л. Жарков, А. А. Лемперт, А. В. Супруновский
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
zharkm@mail.ru, as.irgups@gmail.com, lempert@icc.ru

Универсальными называются морские порты, которые предназначены для обработки различных типов грузов: генеральных, насыпных, навалочных [1]. Для них характерна смена оборудования на причале при разгрузке и погрузки судна в зависимости от типа перевозимого груза, поэтому время обработки судна существенно меняется. При этом такие объекты в экономически развитых странах с многопрофильной экономикой преобладают над специализированными системами, что делает задачу исследования работы универсальных морских портов весьма актуальной.

В типовой структуре порта присутствуют: причалы с перегрузочным оборудованием, зона складов и наземный грузовой фронт. На них регулярно выполняются однотипные перегрузочные операции, продолжительность которых не детерминирована из-за влияния большого числа случайных факторов (погода, ошибки персонала). При этом размеры самих судов могут существенно меняться: от 10 до 200 тыс. тонн, что также влияет на время перевалки.

Для учета сложной структуры универсального порта, смены технологии обработки грузов на причалах и учета недетерминированного времени их перевалки применяется нестационарная сеть массового обслуживания (СеМО) [2,3]. В ней имеется несколько входящих групповых потоков заявок, которые описывают прибытие груза на морском и наземном транспорте [3]. Функционирование различных структурных элементов порта описывается узлами (системами массового обслуживания, СМО) СеМО трех типов:

– $*/M^X/n_i/m_i$ – многоканальные СМО с ограниченной очередью моделируют функционирование автомобильной стоянки, пропускного пункта и складов, где X – случайная величина, которая описывает размер соответствующей партии груза;

– $*/M(t)/n_i/m_i(X)$ – многоканальные СМО с меняющейся вместимостью очереди отображают процесс разгрузки и погрузки судна, где закон распределения времени обслуживания $M(t)$ меняется по заданному правилу;

– $*/M^X/n_i(u_i)/0$ – СМО с отказами и меняющимся числом работающих каналов применяются для описания движения внешних грузовиков между воротами и складами.

Структурная и параметрическая идентификация модели выполнена для универсального порта Куангнинь – одного из крупнейших универсальных портов во Вьетнаме, который, согласно планам, должен стать конечной точкой транспортного коридора из России во Вьетнам. СеМО включает 19 узлов и три входящих потока заявок, описывающие прибытие грузов на автомобильном транспорте, речных и морских судах.

В докладе будет подробно представлена математическая модель работы порта Куангнинь. Также приведены результаты ее численного исследования, полученная на их основе оценка пропускной способности объекта, рекомендации по ее увеличению.

1. Ботвинов В.Ф. Устройство и оборудование морского порта. М: РУТ (МИИТ), 2012. 128 с.
2. Ивницкий В.А. Теория сетей массового обслуживания. М.: Физматлит, 2004. 772 с.
3. Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of a Coal Transshipment Complex Based on a Queuing Network // Appl. Sci. 2024. Vol. 14. P. 6970.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00264).

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА НЕЙРОННОЙ МОДЕЛИ ШЕПАРДА*

Т. С. Зароднюк, А. Ю. Горнов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
tz@icc.ru

Оценка одного варианта для критериев качества в задачах оптимального управления требует знания значения функционала, традиционно получаемого только путем интегрирования системы дифференциальных уравнений на выбранном управлении. Решение этой задачи за последние десятилетия существенно ускорено как за счет продвижения быстродействия процессоров, так и путем разработки новых алгоритмов интегрирования. В учебных работах общедоступные компьютеры способны решить за одну секунду до нескольких тысяч задач Коши, что позволяет надеяться на быстрый поиск оптимального управления. Тем не менее, в прикладных задачах могут встречаться модели, для которых расчет одного варианта занимает длительное время. Среди источников таких экстремальных задач можно указать модели с жесткими системами обыкновенных дифференциальных уравнений, модели в частных производных, модели с отклоняющимся аргументом, гибридные модели и т.д. С позиций теории экстремальных задач такие постановки могут быть трактованы как минимизация вычислительно трудоемких функционалов (Expensive Function Optimization [1]).

В докладе обсуждается подход к построению экономичных алгоритмов поиска оптимального управления, основанных на прогнозировании значения функционала для конкретного управления, не требующего решения задачи Коши. В качестве прогнозного инструмента используется модель Шепарда (см., напр., [2]), точнее говоря, модель Шепарда нейронного типа (см. [3]). Попытки использования классической аппроксимации Шепарда для некоторых классов задач нами уже производились (см. [4, 5]). Однако, известные недостатки классической модели – «горизонтальное» прохождение аппроксимирующей поверхности через каждый узел существенно ограничивают ее точность и эффективность применения. Нейронная модель Шепарда включает, в дополнение к классической, также и обучаемые компоненты – оценки градиентов в узлах, что позволяет существенно улучшить точность аппроксимации [3].

Все произведенные пробы концентрируются в информационной базе алгоритма, которая в дальнейшем используется для прогноза значения функционала для нового пробного управления. Если оценка пессимистична – функционал больше некоторого заданного порога, опирающегося на известный рекорд, то интегрирование системы отменяется. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили принципиальную работоспособность предложенного подхода.

1. Wang J., Clark S.C., Liu E., Frazier P.I. Parallel Bayesian Global Optimization of Expensive Function // arXiv:1602.05149v4. 5 May 2019.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№° гос. регистрации: 121041300060-4).

2. Caira R., Dell'Accio F. Shepard-Bernoulli operators // Mathematics of computation. 2007. V. 76, № 257. Pp. 299–321.
3. Горнов А.Ю., Финкельштейн Е.А. Метод Шепарда аппроксимации таблично заданных функций и его обобщения // Интеллектуализация обработки информации. 2012. С. 98–101.
4. Горнов А.Ю., Веялко И.А. Метод Шепарда для решения релейных задач оптимального управления // "Информ. и матем. технологии в науке и управлении". 2012. Т. 3. С. 218–224.
5. Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С. Алгоритм поиска оптимального управления на основе аппроксимации Шепарда.

ДВУХВОЛНОВОЙ МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ МНОЖЕСТВА ДОСТИЖИМОСТИ*

Т. С. Зароднюк, А. Ю. Горнов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
tz@icc.ru, gornov@icc.ru

Задача аппроксимации множества достижимости (далее – МД) управляемой системы – одна из самых популярных задач теории фазового оценивания. Возможность эффективного численного решения этой задачи открывает пути к исследованию целого ряда актуальных проблем – поиска глобального экстремума функционалов, построения интегральных воронок, дифференциальных игр, автоматического управления, нормирования воздействий и многих других. В линейном случае (см., напр., [1]), в полном соответствии с теорией, МД является выпуклым, что позволяет использовать для построения алгоритмов ряд удобных теоретических и технологических достижений. Но для нелинейного случая развитие алгоритмического инструментария для МД пока, к сожалению, еще далеко от совершенства.

Основная причина заключается, на наш взгляд, в объективной сложности рассматриваемой задачи. На небольших интервалах времени МД, даже нелинейных систем, сохраняет еще свойство выпуклости. Но с ростом длины интервала времени выпуклость теряется, и геометрия МД становится все сложнее и сложнее: возникают взаимные пересечения, завихрения, внутренние пустоты и т.п. Рано или поздно сложность структуры МД превышает ресурсы гибкости и/или адаптивности любого из известных нам алгоритмов. Можно легко сформулировать критерий качества алгоритма аппроксимации МД, опирающийся на этот количественный показатель: «будем считать тот алгоритм из двух оцениваемых лучшим, который способен показать адекватные результаты аппроксимации на более длинном интервале времени».

В работе [2] был предложен простой метод аппроксимации, направленный на приближенное построение границы МД нелинейной управляемой системы. Метод, названный нами моноволновым, основан на эвристическом варианте «бэнг-бэнг принципа» (см. [3]: «граничные управления с большой вероятностью приводят к граничным же точкам МД»). Реализация этого метода заключается в использовании одной волны пробных управлений с одним переключением, начинающейся в стартовой точке временного интервала и движущейся с небольшим шагом $h = (t_1 - t_0)/N$, N – число узлов сетки) к точке конечной. Метод в состязании с другими известными алгоритмами в сложных системах, конечно, проигрывает, зато очень вычислительно экономичен (требует решения всего $2 \cdot N$ независимых задач Коши, где N – число узлов сетки прогонки) и дает, в ряде задач, хорошее внутреннее приближение МД.

Развивая эту идею, в докладе предложен «двухволновой» метод аппроксимации МД, комбинирующий две волны в пробных управлениях. Метод следует также считать достаточно экономичным – он требует решения всего $4 \cdot N \cdot N$ независимых задач Коши.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№º гос. регистрации: 121041300060-4).

1. Ефремов Р.В., Каменев Г.К., Лотов А.В. Построение экономного описания многогранника на основе теории двойственности выпуклых множеств // Доклады академии наук, Т.399, №5, 2004.
2. Zarodnyuk T., Gornov A. The Modified Monowave Method for the Reachable Set Approximation of the Nonlinear Controlled System on the Plane // Proc. of the 7th Intern. Conf. NLA-2022. P. 153–154.
3. Толстоногов А.А. Экстремальные селекторы многозначных отображений и принцип «бэнг-бэнг» для эволюционных включений // Доклады академии наук СССР. 1990. Т. 317, № 3.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКЛАМНЫХ КАМПАНИЙ ДАННЫХ ЯНДЕКС.ДИРЕКТ

Е. П. Зорин, С. М. Пещерова
Иркутский государственный университет
zorin-ep@mail.ru

Введение. Оптимизация расходов на интернет-рекламу в электронной коммерции сегодня опирается на методы машинного обучения, однако в работах последних лет сохраняются методологические разрывы между предсказанием метрик и их управленческой интерпретацией. Показано, что ML-модели улучшают управление ставками и бюджетом по сравнению с эвристиками, предложены кластеризация и вероятностные зависимости прибыльности, но ограниченность эмпирической базы и вопросы калибровки снижают переносимость результатов [1]. Разработан алгоритм размещения с элементами обучения с подкреплением для e-commerce, однако верификация выполнена преимущественно в имитационной среде, где влияние шума и ограничений платформ учтено частично [2]. Высокую точность прогноза кликов методом SVM демонстрируют в работе [3]. Подтверждается пригодность классических методов для задач цифрового маркетинга, но ориентир направлен главным образом на метрики общей точности, без анализа калиброванности вероятностей и издержек ошибок. Обзор на синтетических наборах подтверждает устойчивость ансамблей и регрессий и подчёркивает необходимость проверки переносимости на реальные данные рекламных кабинетов [4]. Работа [5] фокусируется на выявлении факторов эффективности цифровой рекламы с помощью ML, но ограничена прозрачностью процессов подготовки данных и критериальными порогами управленческих решений. Исследования также указывают на выигрыш от обогащения признаков и комбинирования представлений в задачах CTCVR на отраслевом датасете книжной платформы, при этом высокая зависимость от доменной инженерии усложняет перенос на иные платформы [6]. На этом фоне значимость представляемой работы состоит в закрытии разрыва между сегментацией и объяснимым управленческим выводом на реальных данных российского рынка, поскольку анализ выполнен на операционных выгрузках «Яндекс.Директ», что позволяет учитывать ограничения интеграции, латентность, дисбаланс и реальные экспериментальные эффекты. Научная новизна заключается в связке вероятностной кластеризации рекламных объектов с последующей супервизируемой интерпретацией признаков, после обучения кластерной модели проводится построение предсказателя метки кластера и класс-специфический SHAP-анализ, который переводит сегментацию в набор проверяемых правил для перераспределения бюджета и корректировки параметров кампаний. В отличие от работ, ориентированных на синтетические данные или симуляции, предложенный конвейер демонстрирует воспроизводимую разделимость кластеров на реальных кампаниях и обеспечивает интерпретируемые рекомендации, непосредственно применимые в e-commerce.

Методика исследования. Аналитический конвейер строился по данным рекламных кампаний «Яндекс.Директ» и включал стандартизацию признаков, вероятностную кластеризацию, низкоразмерную визуализацию и последующую интерпретацию модели, предсказывающей принадлежность к кластерам. На этапе подготовки показатели трафика и эффективности (показы, взвешенные показы, клики, показатель кликабельности – CTR, взвешенный CTR, расход в рублях) были

приведены к единому масштабу с использованием StandardScaler, что устранило эффект доминирования переменных, различающихся по порядку величины. Кластерная структура выявлялась с помощью гауссовой смеси: число компонент подбиралось по минимуму информационного критерия Байеса, что обеспечило устойчивый выбор модели и позволило избежать усложнения сегментации. Для диагностики геометрии полученных групп применялась проекция t-SNE, однако визуализация использовалась исключительно для контроля разделимости и не влияла на присвоение меток. Далее обучалась модель RandomForestClassifier, которая по исходным числовым признакам предсказывала метку кластера. Такой шаг даёт две практические возможности: во-первых, провести валидацию сегментации через качество предсказания меток на отложенной выборке; во-вторых, получить объяснимость факторов через TreeExplainer библиотеки SHAP на мультиклассовой постановке. Класс-специфические SHAP-распределения позволили установить, какие признаки (и в каких зонах значений) повышают или снижают вероятность принадлежности объекта к каждому из кластеров, тем самым переводя абстрактную сегментацию в набор операционных критериев для управления кампаниями.

Основные результаты. Кластеризация позволила выделить три статистически различимые группы объявлений с различной эффективностью. Разделимость подтверждается тем, что обученная на исходных признаках модель предсказывает кластерную метку с высокой точностью на валидационных данных, а класс-специфические SHAP-диаграммы демонстрируют согласованную структуру вкладов. На сводном рисунке ниже объединены три SHAP графика по классам (кластерам). Для кластера 1 положительный вклад в принадлежность дают высокие значения показов и взвешенных показов вместе с повышенными значениями CTR и взвешенного CTR, причем отрицательные вклады чаще связаны с завышенным расходом при низкой кликабельности. Такая комбинация признаков характерна для сегмента устойчиво эффективных объявлений, обеспечивающих и охват, и вовлечённость. Для кластера 2 положительные SHAP-вклады формируются главным образом высокими расходами и большим количеством показов при сравнительно низких значениях CTR, что указывает на неэффективное расходование бюджета и потенциальную потребность в корректировке креативов и таргетинга. По шкале вкладов виден выраженный нелинейный характер влияния расхода. Для кластера 0 наибольшие положительные вклады возникают при низких объёмах трафика и умеренных расходах, тогда как рост кликов и кликабельности переводит наблюдения в сторону других кластеров. Такой профиль соответствует слабым связкам с ограниченной статистикой и пониженной операционной значимостью. Тем самым кластеризация оправдывает себя: группы не только геометрически различимы, но и интерпретируемы через наборы признаков, которые по-разному смещают вероятность принадлежности к каждой группе. Совместный анализ трёх SHAP-диаграмм показывает, что эффективный сегмент характеризуется сочетанием высокого охвата и кликабельности при контролируемых расходах, неэффективный - высоким расходом на фоне пониженного CTR, а слабый – невысокими объёмами событий и низкой информативностью для управленческих выводов (Рис. 1).

Эти различия согласуются с распределениями исходных метрик в кластерах и дают основу для практических правил: усиление связок кластера 1, адресная оптимизация ставок и креативов в кластере 2, а также консолидация или исключение малозначимых связок кластера 0.

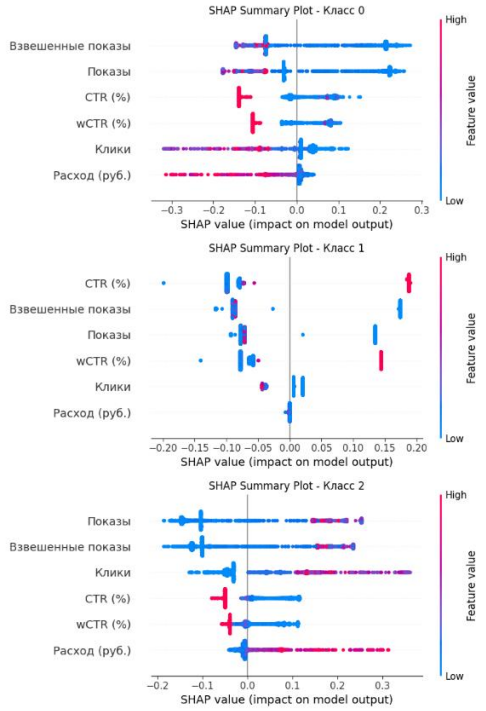


Рисунок 1. SHAP-анализ по кластерам:
объединённые графики для классов 0, 1 и 2.

Заключение. Представленный конвейер на реальных данных «Яндекс.Директ» состоит из стандартизации признаков, вероятностной кластеризация на основе гауссовых смесей, диагностической проекция в низкую размерность и последующей интерпретации через модель RandomForestClassifier и класс-специфический анализ SHAP. Результаты анализа демонстрировали воспроизводимую сегментацию рекламных объектов и устойчивую различимость групп по показателям эффективности. Совместное использование кластеризации и объяснимой модели позволило перейти от описательной сегментации к формализованным правилам перераспределения бюджета и коррекции параметров кампаний, а также подтвердило, что выделенные кластеры соответствуют различным режимам окупаемости и вовлечённости. Экспериментальная апробация на корпусе из семидесяти кампаний показала статистически и экономически значимые изменения ключевых метрик, что указывает на практическую применимость подхода для оптимизации расходов и повышения качества трафика в условиях российского рынка электронной коммерции. Созданная платформа фиксирует этот методический результат в инженерно завершённом виде. Обеспечены интеграция с операционными выгрузками, единая схема признаков, контролируемая латентность аналитического контура и воспроизводимость вычислений. Сегментация подтверждается предсказателем метки кластера, а интерпретации на основе SHAP переводятся в прозрачные правила, пригодные для регламентов закупки трафика и настройки креативов. Для российского контекста это имеет самостоятельную ценность, поскольку демонстрирует переносимость современных методов машинного обучения из симуляционных и синтетических сред на реальные данные рекламных кабинетов и формирует основу для промышленной автоматизации аналитики.

Дальнейшее развитие включает расширение корпуса данных за счёт новых тематик и каналов, оценку стабильности кластерной структуры на скользящем окне и внедрение замкнутого контура управления, в котором интерпретируемые прогнозные

модели инициируют автоматические сценарии изменения ставок и распределения бюджетов под заданные ограничения по целевым показателям. Ожидается, что интеграция таких механизмов усилит эффект на уровне бизнес-практик и станет вкладом в развитие доказательных подходов машинного обучения в маркетинге.

1. Jha A., Sharma P., Upmanyu R., Sharma Y., Tiwari K. Machine Learning-Based Optimization of E-Commerce Advertising Campaigns // Proc. ICAART 2024. Vol. 2. P. 531–541. DOI: 10.5220/0012456700003636.
2. Feng H., Gao Y. Ad Placement Optimization Algorithm Combined with Machine Learning in Internet E-Commerce // Preprints, 2025, 2025022167. DOI: 10.20944/preprints202502.2167.v1.
3. Sangsawang T. Predicting Ad Click-Through Rates in Digital Marketing with Support Vector Machines // Journal of Digital Market and Digital Currency. 2024. 1(3). P. 225–246. DOI: 10.47738/jdmdc.v1i3.20.
4. Islam M.R., Alam M., et al. Leveraging Machine Learning for Insights and Predictions in Synthetic E-Commerce Data in the USA: A Comprehensive Analysis // Journal of Ecohumanism. 2025. 4(2). P. 2394–2420.
5. Berlilana B., Hariguna T., El Emary I.M.M. Enhancing Digital Marketing Strategies with Machine Learning for Analyzing Key Drivers of Online Advertising Performance // Journal of Applied Data Sciences. 2025. 6(2). P. 817–827.
6. Wei S., et al. Click-through Conversion Rate Prediction Model of Book E-Commerce Platform Based on Feature Combination and Representation // Expert Systems with Applications. 2024. 238:122276. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.122276.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ*

И. Н. Игнатьев
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
ingnatev@icc.ru

В настоящее время решение широкого спектра задач (например, задач экологического мониторинга природных территорий) осуществляется с помощью сервис-ориентированных приложений. В таких приложениях схема решения задачи реализуется композицией сервисов – научным рабочим процессом (НРП, англ., Scientific Workflow), описывающим последовательно-параллельное выполнение сервисов на разнородных географически-распределенных вычислительных ресурсах и передачу сообщений между сервисами, а также извлечение, обработку и передачу данных при проведении экспериментов.

При выполнении сервис-ориентированных приложений (СОП) в гетерогенной распределенной вычислительной среде зачастую возникает необходимость рационального выбора ресурсов и определения сценариев проведения распределенных вычислений с точки зрения их эффективности, надежности, безопасности и стоимости. Применение имитационного моделирования для исследования выполнения СОП в ГРВС, как правило, оказывает существенную помощь в решении этих вопросов [1].

Работа посвящена сравнительному анализу современных инструментов моделирования распределенных вычислений. Для каждого инструмента обсуждаются вид программного обеспечения, его системные характеристики и функциональные возможности (рис. 1).

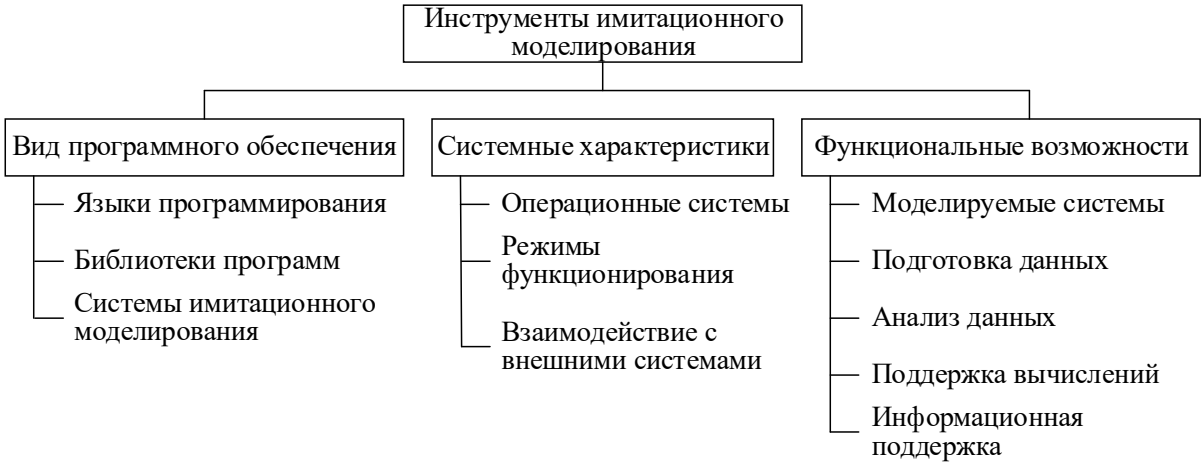


Рисунок 1. Схема сравнительного анализа систем имитационного моделирования

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» (рег. № 121032400051-9).

Достаточно популярны системы имитационного моделирования общего назначения (GPSS World [2], AnyLogic [3] и др.), которые можно применять в разных предметных областях, в том числе и для исследования распределенных вычислений. В тоже время пристальное внимание уделяется системам, специализированным на изучении информационно-вычислительных и телекоммуникационных систем, таких как GridSim [4] и CloudSim [5], а также workflow-ориентированным симуляторам, учитывающим структуры зависимостей и особенности управляющих сервисов (таких как WorkflowSim [6], WRENCH (на базе SimGrid) [7] и DISSECT-CF-WMS [8].

Следует отметить, что специализированные системы более эффективны в создании моделей распределенных вычислений. Они позволяют осуществлять моделирование приложений в вычислительных сетях, облачных инфраструктурах, высокопроизводительных комплексах и Grid-системах, а также в других разнородных распределенных средах. Однако при этом остается ряд нерешенных в полной мере проблем: сложность учета специфики решаемых задач; недостаточная детализация характеристик заданий приложений; разнородность форматов описания потоков заданий; слабая автоматизация поддержки модификации моделей; необходимость изучения специальных языков программирования.

Все вышесказанное актуализирует разработку новых инструментальных средств, расширяющих и дополняющих возможности известных инструментов имитационного моделирования применительно к исследованию процессов выполнения сервис-ориентированных приложений (СОП) в ГРВС с поддержкой научных рабочих процессов.

1. Феоктистов А.Г. Корсуков А.С., Дядькин Ю.А. Инструментальные средства имитационного моделирования предметно-ориентированных распределенных вычислительных // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 30–60.
2. GPSS World URL: https://elina-computer.ru/static/gpss-world.html
3. AnyLogic URL: https://www.anylogic.ru/
4. GridSim URL: https://gridsim.hevs.ch/#
5. CloudSim URL: https://clouds.cis.unimelb.edu.au/cloudsim/
6. WorkflowSim URL: https://workflowsim.github.io/WorkflowSim-1.0/
7. WRENCH URL: https://wrench-project.org/S
8. DISSECT-CF-WMS URL: https://github.com/Ali-Alhaboby/Dissect-cf-WMS

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА СБОРА И АНАЛИЗА ЗАПОЛНЕННОСТИ СРЕДСТВ РАЗМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ТУРИСТИЧЕСКИХ САЙТОВ-АГРЕГАТОРОВ

В. П. Исполатов[1], Ю. В. Пестова[1,2], О. А. Николайчук[1,2]
[1]Иркутский государственный университет,
[2]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
yupest@icc.ru

В работе представлена информационная система мониторинга заполненности средств размещения, основанная на данных туристических сайтов-агрегаторов (на примере платформы 101Hotels).

Сценарий сбора данных реализован на языке Python с использованием открытых API агрегаторов. Автоматизация запуска осуществляется через GitHub Actions [1], результаты сбора данных сохраняются в распределённую базу данных Yandex Database, обеспечивающую надёжное хранение и обновление информации без дублирования. Для аналитической обработки и визуализации используется BI-платформа Yandex DataLens [2], где данные отображаются в виде интерактивной информационной панели (дашборда) [3] с фильтрацией по регионам, сезонам и датам.

Решение позволяет выявлять динамику спроса, сезонные колебания и пиковые периоды, что даёт возможность использовать систему не только для мониторинга, но и для прогнозирования загрузки и оптимизации ценовой политики. В отличие от методов веб-скрапинга, использование официальных API повышает надёжность и масштабируемость системы.

Разработанный подход [4] может быть адаптирован под другие агрегаторы (Островок, Суточно.ру и др.), обеспечивая единый подход к сбору и анализу данных в сфере туризма. Система демонстрирует как научную значимость (интеграция облачных технологий с методами автоматизации), так и практическую ценность – поддержку управленческих решений на основе объективных данных в реальном времени.

Разработанная система [5] обеспечивает ежедневный сбор, хранение и визуализацию данных о доступных номерах и ценах, позволяя оперативно отслеживать состояние туристической инфраструктуры.

1. Документация GitHub Actions [Электронный ресурс]. – URL: https://docs.github.com/ru/actions (дата обращения: 13.05.2025).
2. Цукергохер И. Yandex Cloud открыла исходный код DataLens [Электронный ресурс] // Хабр. – 2023. – 26 сент. – URL: https://habr.com/ru/news/763402/ (дата обращения: 13.05.2025).
3. Итоговый дашборд для просмотра данных [Электронный ресурс]. – URL: https://datalens.yandex/im6txywgr7cs4 (дата обращения: 13.05.2025).
4. Репозиторий проекта автоматированной технологии сбора данных о заполненности средств размещения. [Электронный ресурс]. – URL: https://github.com/Vad1mah/101hotel_parser (дата обращения: 13.05.2025).
5. Мониторинг сферы регионального туризма на основе анализа данных из открытых источников [Электронный ресурс]. – URL: https://irk-tourism.hostfl.ru/ (дата обращения: 13.05.2025).

О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ШАРА ЧАПЛЫГИНА С РОТОРОМ

В. Д. Иртегов, Т. Н. Титоренко
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
irteg@icc.ru, titor@icc.ru

В докладе представлены результаты качественного анализа дифференциальных уравнений, описывающих качение без скольжения уравновешенного динамически несимметричного шара с ротором по неподвижной горизонтальной абсолютно шероховатой плоскости в поле постоянной тяжести. Осесимметричный ротор, размещенный внутри шара, вращается относительно своей оси симметрии с постоянной скоростью. Рассматриваются уравнения движения шара в обозначениях, принятых в [1]:

$$
\begin{aligned}
&(D_1 - D\gamma_1^2)\dot{\omega}_1 - D\gamma_1(\gamma_2\dot{\omega}_2 + \gamma_3\dot{\omega}_3) + k_3\omega_2 - (k_2 + (D_2 - D_3)\,\omega_2)\,\omega_3 = 0,\\
&D\gamma_2(\gamma_1\dot{\omega}_1 + \gamma_3\dot{\omega}_3) - (D_2 - D\gamma_2^2)\dot{\omega}_2 + k_3\omega_1 - (k_1 + (D_1 - D_3)\,\omega_1)\,\omega_3 = 0,\\
&D\gamma_3(\gamma_1\dot{\omega}_1 + \gamma_2\dot{\omega}_2) - (D_3 - D\gamma_3^2)\dot{\omega}_3 - k_2\omega_1 + (k_1 + (D_1 - D_2)\,\omega_1)\,\omega_2 = 0, \quad (1)\\
&\dot{\gamma}_1 = \gamma_2\omega_3 - \gamma_3\omega_2, \dot{\gamma}_2 = \gamma_3\omega_1 - \gamma_1\omega_3, \dot{\gamma}_3 = \gamma_1\omega_2 - \gamma_2\omega_1,\\
&D_i = I_i + D \ \ (i = 1,2,3).
\end{aligned}
$$

Здесь $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ – вектор угловой скорости тела в проекциях на оси координатной системы, связанной с ним; $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ – единичный вектор, направленный по вертикали вверх, в проекциях на те же оси; $\mathbf{I} = (\mathrm{I}_1, \mathrm{I}_2, \mathrm{I}_3)$ – тензор инерции тела, $\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3)$ – постоянный вектор гиростатического момента в теле; $D = mR^2$, где m – масса шара, R – его радиус.

Система (1) допускает следующие первые интегралы

$$
\begin{aligned}
&2H = D_1\omega_1^2 + D_2\omega_2^2 + D_3\omega_3^2 - D(\gamma_1\omega_1 + \gamma_2\omega_2 + \gamma_3\omega_3)^2 = 2h,\\
&V_1 = (D_1\omega_1 - D\gamma_1(\gamma_1\omega_1 + \gamma_2\omega_2 + \gamma_3\omega_3) + k_1)^2 + (D_2\omega_2 - D\gamma_2(\gamma_1\omega_1 + \gamma_2\omega_2 + \gamma_3\omega_3) + k_2)^2\\
&\quad + (D_3\omega_3 - D\gamma_3(\gamma_1\omega_1 + \gamma_2\omega_2 + \gamma_3\omega_3) + k_3)^2 = c_1,\\
&V_2 = (D_1\omega_1 + k_1)\gamma_1 + (D_2\omega_2 + k_2)\gamma_2 + (D_3\omega_3 + k_3)\gamma_3 - D(\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2)\\
&\quad \times(\gamma_1\omega_1 + \gamma_2\omega_2 + \gamma_3\omega_3) = c_2, \quad V_3 = \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1
\end{aligned}
$$

и является вполне интегрируемой.

Посредством решения задачи на условный экстремум проводится качественный анализ уравнений движения (1): из необходимых условий экстремума первых интегралов задачи находятся стационарные инвариантные множества этих уравнений и исследуется их устойчивость по Ляпунову. Полученные указанным способом нульмерные множества называются стационарными решениями, множества положительной размерности – стационарными инвариантными многообразиями (ИМ).

Найдены семейства стационарных решений, соответствующие положениям равновесия, перманентным вращениям и регулярным прецессиям шара, а также ИМ, которым эти решения принадлежат. Для ряда решений получены достаточные условия устойчивости и сопоставлены с необходимыми.

1. Москвин А.Ю. Шар Чаплыгина с гиростатом: особые решения // Нелинейная динамика. 2009. Т. 5, № 3. С. 345–356.

ТЕОРЕМА СУЩЕСТВОВАНИЯ, ТОЧНЫЕ И ПРИБЛИЖЕННЫЕ РЕШЕНИЯ С НУЛЕВЫМИ ФРОНТАМИ ДЛЯ МНОГОМЕРНОЙ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ХИЩНИК-ЖЕРТВА»*

А. Л. Казаков[1], Л. Ф. Спевак[2]
[1]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
[2]Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН
kazakov@icc.ru

Введение. В монографии известного специалиста в области математической биологии Дж. Мюррея (J.D Murray) [1] в качестве модели взаимодействия популяций была предложена следующая квазилинейная параболическая [2] система второго порядка с двумя независимыми переменными:

$$u_t = \alpha_1 u_x + \beta_1 (u v_{xx} + u_x v_x) + F(u,v), \quad v_t = \alpha_2 v_x - \beta_2 (v u_{xx} + u_x v_x) + G(u,v) \qquad (1)$$

Здесь $u(t,x), v(t,x)$ – искомые функции (плотности популяций); t, x – независимые переменные (время и пространственная координата); $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ – константы (обычно – положительные); $F(u,v), G(u,v)$ – известные функции своих аргументов (достаточно гладкие).

Подобные математические объекты весьма широко распространены в математической биологии [3, 4] и обычно именуются системами "хищник-жертва" (predator-prey) [1]. Отметим, что наиболее естественным здесь является квадратичный вид функций F, G [5], который соответствует правым частям уравнений в классической модели Лотки-Вольтерра [6], однако рассматривают и более общие постановки [7, 8].

Пусть $F(0,0) = G(0,0) = 0$. Легко убедиться, что при выполнении этого условия система (1) имеет тривиальное решение. С другой стороны, при $u = 0, v = 0$ в (1) равны нулю множители перед старшими (вторыми) производными. Это приводит к вырождению параболического типа системы, благодаря чему возникает возможность построения решений, описывающих возмущения, распространяющиеся по покоящемуся (нулевому) фону с конечной скоростью. В зависимости от физической интерпретации, последние в научной литературе называют тепловыми [9], фильтрационными [10] или диффузионными [11] волнами.

Проблема построения для (1) решений, имеющих вид диффузионных волн, ранее была рассмотрена в работах [5] (при конкретных $F(u,v), G(u,v)$) и [7, 8] (в общей постановке). В частности, удалось доказать теоремы существования и единственности нетривиальных аналитических [12] решений (1) с граничными условиями

$$u|_{x=a(t)} = 0, \quad v|_{x=a(t)} = 0, \qquad (2)$$

где $a(t)$ – достаточно гладкая функция, которая определяет *нулевой фронт* для обеих искомых функций, а также построить точные, сводящиеся к интегрированию систем обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ), и приближенные решения искомого вида [8].

* Исследования выполнены в рамках госзадания Минобрнауки России по проектам «Аналитические и численные методы математической физики в задачах томографии, квантовой теории поля и механике жидкости и газа», № гос. регистрации: 121041300058-1.

Существенным недостатком модели (1), ограничивающим ее применение, является ее одномерность. В этой связи, далее рассмотрим аналог системы (1) для многих пространственных переменных.

Постановка задачи. Рассмотрим следующее обобщение системы (1):

$$u_t = \alpha_1 \mathrm{div}\, u + \beta_1(u\Delta v + \nabla u \nabla v) + F(u,v), \quad v_t = \alpha_2 \mathrm{div}\, v_x - \beta_2(v\Delta u + \nabla u \nabla v) + G(u,v). \tag{3}$$

Здесь $u(t,\mathbf{x}), v(t,\mathbf{x})$ – искомые функции, $t, \mathbf{x} = (x_1, x_2, ..., x_n)$ – независимые переменные. Дивергенция, градиент и лапласиан берутся по пространственным переменным $x_1, x_2, ..., x_n$. Смысл и значения констант $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ сохраняются.

Для системы (3) рассмотрим краевые условия, которые определяют общий для обеих искомых функций нулевой фронт

$$u\,|_{x_1 = a(t, x_2, ..., x_n)} = 0, \quad v\,|_{x_1 = a(t, x_2, ..., x_n)} = 0. \tag{4}$$

Для случаев n = 2,3 задача (3), (4) допускает понятную и естественную интерпретацию с точки зрения предметной области: взаимодействие популяций на плоскости (наземные виды) или в пространстве (птицы, летающие насекомые и т.п.). Если же n>3, то прикладное значение постановки не столь очевидно, однако она может быть рассмотрена как математический объект.

Результаты. Задача (3), (4) при выполнении условия $F(0,0) = G(0,0) = 0$, очевидно, имеет тривиальное решение. Основной целью настоящего исследования является поиск для нее нетривиальных решений.

Под *аналитической* здесь и далее понимается функция, совпадающая на некотором множестве со своим тейлоровским разложением.

Теорема

Пусть выполнены следующие условия:

а) $F(u,v), G(u,v)$ *– аналитические функции в некоторой окрестности точки* $u = 0, v = 0$, *и* $F(0,0) = G(0,0) = 0$; *б)* $a(t, x_2, ..., x_n)$ *– аналитическая функция в некоторой окрестности точки* $t = 0, x_2 = 0, ..., x_n = 0$; *в) справедливы неравенства* $a_t\,|_{t=0} + \alpha_i \left(1 - \sum_{k=2}^{n} a_{x_k}\,|_{t=0}\right) \neq 0, i = 1,2.$ *Тогда задача* (3), (4) *имеет единственное нетривиальное аналитическое решение в некоторой окрестности гиперповерхности* $x_1 = a(t, x_2, ..., x_n)$.

Доказательство теоремы выполняется в два этапа. На первом строится формальное решение в виде рядов по степеням переменной $x_1 - a(t, x_2, ..., x_n)$ с рекуррентно вычисляемыми коэффициентами. При этом условие в) обеспечивает возможность однозначного определения последних. На втором этапе сходимость построенных рядов доказывается методом мажорант [7].

Поскольку доказательство теоремы носит конструктивный характер, отрезки рядов, в виде которых представлено решение задачи (3), (4), применяются для выполнения расчетов в случае двух пространственных переменных. В частности, удалось получить машинные оценки радиуса сходимости рядов. Так, для линейных функций $F(u,v), G(u,v)$ он оказывается весьма значительным, более того, в некоторых экспериментах установить границу области сходимости не удалось. Если же $F(u,v), G(u,v)$ являются нелинейными (например, квадратичными), то радиус области сходимости рядов, как правило, невелик (не превосходит единицы).

Также с использованием анзаца специального вида [13] получены точные решения системы (3), построение которых сводится к интегрированию СОДУ. При этом условия (4) принимают вид $u(0) = 0, v(0) = 0$.

Для решения указанных СОДУ предложен итерационный численный алгоритм, основанный на методах коллокаций и радиальных базисных функций [14], который, в отличие от метода рядов, не предполагает аналитичности входных данных и позволяет построить решение рассматриваемой задачи на фиксированном интервале времени. С использованием итерационного метода выполнены расчеты, сравнение результатов которых с отрезками рядов показало близость значений, полученных различными способами, что косвенно подтверждает их корректность. Более того, итерационный алгоритм в ряде случаев продемонстрировал устойчивую сходимость даже в области расходимости рядов.

1. Murray J.D. Mathematical biology II: Spatial models and biomedical applications. Interdisciplinary applied mathematics. Vol. 18. New York: Springer, 2003. 837 p.
2. Ладыженская О.А., Солонников В.А., Уральцева Н.Н. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа. М.: Наука, 1967.
3. Perthame B. Parabolic Equations in Biology. Growth, Reaction, Movement and Diffusion. NY: Springer, 2015.
4. Volpert V., Petrovskii S. Reaction-diffusion waves in biology: new trends, recent developments // Physics of Life Reviews. 2025. V. 25. P. 1-20.
5. Кузнецов П.А. Аналитические диффузионные волны в нелинейной параболической модели “хищник-жертва” // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2022. Т. 28, № 2. С. 158-167.
6. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование / пер. с фр. О. Н. Бондаренко; под ред. и с послесл. Ю. М. Свирежева. М. : Наука, 1976.
7. Казаков А.Л., Кузнецов П.А. Аналитические решения с нулевым фронтом для нелинейной вырождающейся параболической системы // Дифференциальные уравнения. 2022. Т. 58, № 11. С. 1461-1470.
8. Kazakov A.L., Spevak L.F. Exact and approximate solutions to the quasilinear parabolic system “predator-prey” with zero fronts // Journal of Mathematical Sciences. 2025. V. 292, № 5. P. 551-560.
9. Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука, 1987.
10. Сидоров А.Ф. Избранные труды. Математика. Механика. М.: Физматлит, 2001.
11. Kazakov A., Kuznetsov P., Lempert A. Analytical solutions to the singular problem for a system of nonlinear parabolic equations of the reaction-diffusion type // Symmetry. 2020. V. 12, № 6. P. 999.
12. Баутин С.П., Казаков А.Л. Обобщенная задача Коши и ее приложения. Новосибирск: Наука, 2006.
13. Казаков А.Л., Орлов С.С. О некоторых точных решениях нелинейного уравнения теплопроводности // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2016. Т. 22, № 1. С. 112-123.
14. Kazakov A. Solutions to nonlinear evolutionary parabolic equations of the diffusion wave type // Symmetry. 2021. V. 13, № 5. P. 871.
15. Chen C.S., Chen W., Fu Z.J. Recent Advances in Radial Basis Function Collocation Methods. Berlin/Heidelberg: Springer, 2013.

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОРЯДКА ЧТЕНИЯ ДОКУМЕНТА*

М. А. Карпенков, Д. Е. Копылов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М Матросова СО РАН
Иркутский государственный университет
karpenkov.2004@mail.ru, it-daniil@yandex.ru

Восстановление порядка чтения (Reading Order Detection) в неструктурированных документов – одна из ключевых задач анализа документов. Пренебрежение порядком чтения ведет к потере семантики, особенно в документах со сложной структурой (научные публикации, газеты, журналы).

Существует два основных подхода в решении задачи: методы, основанные на машинном обучении, и алгоритмические методы. Первая группа методов обрабатывает широкий класс документов, но требуют данных для обучения и значительного количества вычислительных ресурсов. Вторая группа методов базируется на формальных правилах геометрического анализа блоков. Основным преимуществом последних являются низкие вычислительные затраты и объяснимость результатов.

В данной работе в качестве сортируемых блоков рассматриваются регионы (абзацы, заголовки и т.д.), что является частным случаем задачи восстановления порядка чтения. Другим распространенным частным случаем является выбор в качестве блоков строк [1, 2].

Для восстановления порядка чтения характерна следующая постановка задачи: дано множество текстовых блоков $B = \{b_i\}$, где $b_i = (x_{top_left}, y_{top_left}, width, height)$ – координаты ограничивающей рамки текстового блока. Требуется каждому элементу b_i множества B присвоить его номер в порядке чтения.

В рамках настоящей работы было отобрано и рассмотрено три метода:

– Метод, базирующийся на теории аргументации [3], направленный на выделение непротиворечивого порядка чтения документа;

– Метод XY-CUT [4], основанный на разделении документа на области по горизонтальным и вертикальным впадинам;

– Сортировка блоков слева направо и сверху вниз.

Для тестирования алгоритмов был выбран набор документов PubLayNet (200 страниц), который содержит информацию о сегментированных блоках документов. Дополнительно каждому блоку вручную был присвоен его порядковый номер, поскольку в исходном наборе данных этой информации не содержалось. В качестве метрик для оценки работы алгоритмов выбраны BLEU и ARD [5].

По результатам тестирования выяснилось, что алгоритм, основанный на теории аргументации, представленный в статье [3], оказался не пригоден для обработки документов, содержащих большое количество блоков. Это связано с тем, что представленный алгоритм в своей реализации содержит переборную задачу сложности 2^A, где A – количество аргументов, полученных из документа (число аргументов пропорционально количеству блоков). Ясно, что для решения задачи авторы реализовывали направленный перебор, но информации о том, как его организовать в работе не содержится.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9)

По результатам тестирования («табл. 1») алгоритм XY-CUT оказался лучшим с точки зрения метрик BLEU и ARD, при этом справляется с задачей за приемлемое время (по сравнению с методом на основе теории аргументации).

Одной из проблем всех рассмотренных в работе алгоритмов является то, что, если порядок чтения конкретного документа зависит от информации, содержащейся в текстовых блоках, алгоритмы не смогут правильно восстановить этот порядок в силу того, что они работают только с геометрической информацией.

Таблица 1 – Результаты тестирования алгоритмов

	BLEU	ARD	Время (сек)
XY-CUT	0.9582	1.96	0.050
Слева направо сверху вниз	0.5073	15.04	0.003

Потенциально для улучшения качества решения поставленной задачи можно использовать подходы, работающие не только с геометрической информацией о макете документа, но и учитывающие их текстовое содержание. В качестве преодоления данного ограничения можно использовать большие языковые модели, но при условии комбинирования их (например, передавать алгоритм в качестве промптов к моделям), а не полной замены алгоритмических подходов.

1. Breuel T. M. High performance document layout analysis // Proceedings of the Symposium on Document Image Understanding Technology, 2003. Val. 5.
2. Aiello M., Smeulders A. M. W. Bidimensional relations for reading order detection // In EPRINTS-BOOK-TITLE University of Groningen, Johann Bernoulli Institute for Mathematics and Computer Science, 2003.
3. Ferilli S. et al. An Abstract Argumentation-based Strategy for Reading Order Detection // In Proceedings of the 2014 ACM symposium on Document engineering (DocEng '14), 2014. P. 45–48. DOI: 10.1145/2644866.2644883.
4. Gu Z. et al. Xylayoutlm: Towards layout-aware multimodal networks for visually-rich document understanding //Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2022. P. 4583–4592. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00454.
5. Wang Z. et al. Layoutreader: Pre-training of text and layout for reading order detection. CoRR, Vol. abs/ 2108.11591, 2021 [Online]. Available at: https://arxiv.org/abs/2108.11591.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ ДВУХМЕРНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ФРЕДГОЛЬМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЧЛЕНА БЕРНШТЕЙНА

Квон Ун Ген, Чве Мен Су
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
kug86928@star-co.net.kp
cms6598@star-co.net.kp

Мы установили новый численный метод для поиска решения системы двухмерных интегральных уравнений Фредгольма второго порядка в произвольном конечном интервале.

Форма системы двухмерного интегрального уравнения Фредгольма второго рода выглядит так:

$$\sum_{j=1}^{m} u_{ij}(r,s)z_j(r,s) = f_i(r,s) + \sum_{j=1}^{m} \beta_{ij} \int_c^d \int_a^b H_{ij}(r,s,x,y)z_j(x,y)dxdy, \quad i = 1,\ldots,m \tag{1}$$

Здесь $z_j(r,s)$ неизвестные функции, β_{ij} постоянные параметры, $H_{ij}(r,s,x,y)$ и $f_i(r,s)$, $u_{ij}(r,s)$ определенные реальные функции, и $z_j(r,s) = [z_1(r,s), z_2(r,s),\ldots, z_m(r,s)]$ определяется векторным раствором .

Чтобы найти численное решение двухмерного интегрального интегрального уравнения Фредгольма второго порядка (1), мы заменяем неизвестные функции $z_j(r,s)$ и $z_j(x,y)$ (n, k) двумерные функции на основе Бернштейна (n, k).

Тогда уравнение (1) будет таким:

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=0}^{n}\sum_{q=0}^{k} u_{ij}(r,s)z_j^{p,q}\gamma_{pq}A_{pq}(r,s) = f_i(r,s)$$

$$+ \sum_{j=1}^{m}\sum_{p=0}^{n}\sum_{q=0}^{k} \beta_{ij} z_j^{p,q}\gamma_{pq} \int_c^d \int_a^b H_{ij}(r,s,x,y)A_{pq}(x,y)dxdy, i = 1,\ldots,m$$

Это уравнение может быть выглядеть и так:

$$f_i(r,s) = \sum_{j=1}^{m}\sum_{p=0}^{n}\sum_{q=0}^{k} z_j^{p,q}\gamma_{pq}\left[u_{ij}(r,s)A_{pq}(r,s) - \beta_{ij}\int_c^d \int_a^b H_{ij}(r,s,x,y)A_{pq}(x,y)dxdy\right], \quad i = 1,\ldots,m$$

Здесь $A_{pq}(x,y) = (x-a)^p(b-x)^{n-p}(y-c)^q(d-y)^{k-q}$ и $\gamma_{pq} = \dfrac{\binom{n}{p}\binom{k}{q}}{(b-a)^n(d-c)^k}$.

Чтобы найти $z_j^{p,q}$, j=1,2,...,m, p=0,1,...,n, q=0,1,...,k, r заменим на $r_u = a + \dfrac{(b-a)}{n}u + \varepsilon$, $u = 0,1,\ldots,n-1$, $r_n = b - \varepsilon$, и s на $s_v = c + \dfrac{(d-c)}{k}v + \varepsilon$, $v = 0,1,\ldots,k-1$, $s_k = d - \varepsilon$.

Здесь ε произвольная постоянная $0 < \varepsilon < 1$.

Разделённые точки в интервале [a, b] и [c, d] могут выбирать произвольную точки, кроме особых значений интегральных уравнений.

И так для $z_j^{p,q}$ получаются следующие линейные системы уравнения:

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{p=0}^{n}\sum_{q=0}^{k} d_{i.j,(u,v)}^{p,q} z_j^{p,q} = f_i(r_u, s_v),\ \ j = 1,2,\ldots,m,\ \ u = 0,1,\ldots,n,\ \ v = 0,1,\ldots,k \tag{2}$$

$$d_{i.j,(u,v)}^{p,q} = \gamma_{pq}\left[u_{ij}(r,s)A_{pq}(r,s) - \beta_{ij}\int_c^d\int_a^b H_{ij}(r,s,x,y)A_{pq}(x,y)dxdy\right]$$

Здесь .

Т.е.

$$d_{i.j,(u,v)}^{p,q} = \frac{\binom{n}{p}\binom{k}{q}}{(b-a)^n(d-c)^k}\Big[u_{ij}(r,s)(r-a)^p(b-r)^{n-p}(s-c)^q(d-s)^{k-q} -$$

$$-\beta_{ij}\int_c^d\int_a^b H_{ij}(r,s,x,y)(x-a)^p(b-x)^{n-p}(y-c)^q(d-y)^{k-q}dxdy\Big]$$

(3)

Это уравнение является линейной системой уравнений с $m(n+1)(k+1)$ неизвестным $z_j^{p,q}$, поэтому это будет выглядеть следующим образом при использовании в матричной

форме:

$$DZ = E \tag{4}$$

Здесь

$$D = \begin{bmatrix} D'_{1,1} & D'_{1,2} & \cdots & D'_{1,m} \\ D'_{2,1} & D'_{2,2} & \cdots & D'_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D'_{m,1} & D'_{m,2} & \cdots & D'_{m,m} \end{bmatrix},\quad \mathrm{Z} = \begin{bmatrix} \mathrm{Z}_1 \\ \mathrm{Z}_2 \\ \vdots \\ \mathrm{Z}_m \end{bmatrix},\quad E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix}$$

$D'_{i,j}$ матрицы (n+1)(k+1)типа, Z_j, E_j соответственно, как векторы (n+1)(k+1) стобцые последовательности.

$$D'_{i,j} = \begin{bmatrix} d_{i.j,(0,0)}^{0,0} & d_{i.j,(0,0)}^{0,1} & \cdots & d_{i.j,(0,0)}^{n,k} \\ d_{i.j,(0,1)}^{0,0} & d_{i.j,(0,1)}^{0,1} & \cdots & d_{i.j,(0,1)}^{n,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i.j,(n,k)}^{0,0} & d_{i.j,(n,k)}^{0,1} & \cdots & d_{i.j,(n,k)}^{n,k} \end{bmatrix},\quad Z_j = \begin{bmatrix} Z_j^{0,0} \\ Z_j^{0,1} \\ \vdots \\ Z_j^{n,k} \end{bmatrix},\quad F_j = \begin{bmatrix} f_j(r_0, s_0) \\ f_j(r_0, s_1) \\ \vdots \\ f_j(r_n, s_k) \end{bmatrix}$$

Мы можем найти неизвестное число $z_j^{p,q}$, решая систему уравнений (4) с помощью стандартного метода.

Используя эти неизвестные в уравнении (1), получается $B_{n,k}(z_j^{p,q}(r_u, s_v))$, который является решением двухмерного интегрального интегрального уравнения Фредгольма второго порядка.

1. K. Maleknejad, N. Aghazadeh, M. Rabbani, Numerical solution of second kind Fredholm integral equations system by using a Taylor-series expansion method, Appl. Math. Comput. 175(2)(2006) 1229–1234.

2. F. Khan, M. Omar, Zafar Ullah, Discretization method for the numerical solution of 2D Volterra integral equation based on two-dimensional Bernstein polynomial, AIP Adv. 8(2018)125–209.
3. P. K. Sahu, S. Saha Ray, A new numerical approach for the solution of nonlinear Fredholm integral equations system of second kind by using Bernstein collocation method, Math. Meth. Appl. Sci. 2015, 38 274–280
4. M. Basit, F. Khan, An effective approach to solving the system of Fredholm integral equations based on Bernstein polynomial on any finite interval, Alexandria Engineering Journal(2022)61, 2611–2623.
5. M. Sh. Dahaghin, Sh. Eskandari, Solving two-dimensional Volterra-Fredholm integral equations of the second kind by using Bernstein polynomials, Appl. Math. J . Chinese Univ. 2017, 32(1): 68–78.
6. G. Zhaohui, Hyers-Ulam stability of Fredholm integral equation, Mathematica Aeterna 5(2) (2015) 257–261.

ОДИН ИЗ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОМИНИРУЮЩИХ АКТИВНЫХ ПОЛЮСОВ В УПРАВЛЕНИИ МЕТОДОМ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОЛЮСОВ

Ким Ен Су, Ю Хун, Хон Кан Хек, Пак Се Ян
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
kys731214@star-co.net.kp

В дизайне управления с использованием метода расположения полюсов позиция доминирующих активных полюсов имеет большое влияние на производительность системы управления.

Многие из предыдущих исследований определили местоположение доминирующих активных полюсов в экспериментальном порядке.

Мы используем алгоритм PSO для определения оптимального местоположения доминирующего активных полюсов.

Для удовлетворения требований к производительности системы и устойчивости мы вводим следующие функции оценки.

$$J = IAE + w_\sigma \sigma + f(M_s) \tag{1}$$

Здесь IAE представляет собой интегральную абсолютную оценку следующим образом.

$$IAE = \int_0^\infty |e(t)| dt \tag{2}$$

σ - это перерегулирование.

M_s представлен как максимальная чувствительность следующим образом.

$$M_s = \max_\omega |S(j\omega| = \max_\omega \left| \frac{1}{1 + G_c(j\omega)G(j\omega)} \right| = \max_\omega |1 - T(j\omega| \tag{3}$$

$w_б$- весовой коэффициент для перерегулирования, а $f(M_S)$ - это следующее.

$$f(M_s) = \begin{cases} 0, & 1.2 < M_s < 2 \\ \infty, & other \end{cases} \tag{4}$$

M_S – это обратное число кратчайшего расстояния между характером частоты замкнутой системы и пунктом (-1, j0). При этом большое значение приводит к лучшему соотношению скорости, а малое – к лучшей устойчивости.

Обычно значения M_s расположены между 1.2 и 2.

PSO инициализируется в произвольную популяцию населения и ищет оптимальное решение, обновляя поколение.

Во время каждой эволюции индивидуум обновляется двумя «лучшими» значениями.

Первый - лучшее решение, которое имеет сам индивидуум.

Это значение называется 《*pbest*》.

Другое – лучшее решение для всех индивидуумов.

Это решение называется «*gbest*» в качестве глобального решения.

В PSO каждый индивидуум обновляет свое местоположение, учитывая текущее положение, текущую скорость, текущее расстояние до *pbest* и текущее расстояние до *gbest*.

PSO математически моделируется следующим образом.

$$V_i^{t+1} = wv_i^t + c_1 r_1 (pbest_i - x_i^t) + c_2 r_2 (gbest - x_i^t) \quad (5)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + V_i^{t+1} \quad (6)$$

Здесь v_i^t – это скорость индивидуума в процессе эволюции *t*-времени и *w*-весовая функция. Они обычно выражаются в следующих формах.

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{t_{\max}} t \quad (7)$$

Здесь t_{max} - это максимальное количество итераций, *t* - это текущее количество итераций.

w_{min} и w_{max} определяются как 0.4 и 0.9 соответственно.

c_1 и c_2 являются константами ускорения, которые влияют на скорость сходимости каждого индивидуума, и часто принимаются до 2.0 в соответствии с прошлым опытом.

r_1 и r_2 - это случайное число между [0,1].

x_i^t - это текущее положение индивидуума *i* в *t*-времени.

Во время каждой эволюции каждый индивидуум оптимизирован, оценивая функцию фитнеса на основе фитнеса его решения.

Когда позиция полюса, представляющего колебательные характеристики, представляет собой $p_{1,2} = -\alpha \pm j\beta$, а частота разделения - w_c, индивидуум становится $(\alpha, \beta, \omega_c)$ как трёхмерный индивидуум.

Пространство поиска является областью, определенной

$$(\alpha_{\min}, \alpha_{\max}, \beta_{\min}, \beta_{\max}, \omega_{c_{nin}}, \omega_{c_{\max}}).$$

Согласно [1] мы можем определять *wcmin*=0, *wcmax*=*wk*/2. *wk* – критической частотой.

Выполнение алгоритма PSO вычисляет соответствующие позиции доминирующих активных полюсов и частоты разделения.

С этим значением можно разработать систему управления с обратной связью или определить параметры контроллера PID.

1. ZÍTEK, P. - FIŠER, J. - VYHLÍDAL, T. Ultimate Frequency based Dominant Pole Placement. Proceedings of 9th IFAC Workshop on Time Delay Systems. IFAC. 2010(vol. 1).1-6
2. Milan, J., Gulshan, S., Emre, C., 2023. Load Frequency Control of Hydro-Hydro Power System using Fuzzy-PSO-PID with Application of UC and RFB. Electric Power Components and Systems, Vol 51, No 12, 1156 – 1170.
3. S. Tavakoli., M. Safaei, 2017. Analytical phase-lead controller design using pole placement: a pole-zero ratio minimisation approach, The Institution of Engineering and Technology(IET), Vol. 53 No. 13, 851-852.

ЭВРИСТИКА НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ДВУХЦЕЛЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ С СОВМЕСТИМОСТЬЮ МАШИНЫ

Ким Ен Хо, Хён Чжун, Ким Хак Чхор, Чве Кван Мен
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
kyh851229@star-co.net.kp

В этой статье рассматривается задача планирования, которая минимизирует время завершения и пребывания в двухфазном процессе сборки [1-3]. Первый процесс состоит из параллельных машин с совместимостью, и все компоненты должны обрабатываться в соответствующих машинах в этом процессе. Второй процесс состоит из параллельных машин сборки, каждый из которых собирается из деталей на одной машине.

Для изучения проблемы мы делаем следующие предположения:

1) Порядок обработки деталей на каждой машине сохраняется постоянным.
2) Время установки и время передачи пренебрегают.
3) Прерывание не допускается. Когда начинается обработка одного компонента или продукта, машина не принимает никакой другой работы до завершения работы.
4) Все части продуктов могут начать обработку с начала, и время обработки известно.
5) Все машины могут работать с самого начала без отказа.
6) В процессе обработки деталей машины делают один компонент за раз, и каждый компонент обрабатывается только на одной машине.
7) Сборка любого продукта может быть начата, когда обработка его компонентов завершена.
8) Нет ограничений по ёмкости промежуточного буфера.

Параметры следующие:

N	Набор продуктов. $N = \{J_1, J_2, \ldots, J_{\lvert N\rvert}\}$
N_j	Набор компонентов продукта J_j. $N_j = \{J_{j1}, J_{j2}, \ldots, J_{j\lvert N_j\rvert}\}$
N_s	Общее количество компонентов всех продуктов. $N_s = \sum_{j=1}^{\lvert N\rvert} \lvert N_j\rvert$
M_1	Набор параллельных машин в первом процессе. $M_1 = \{PM_1, PM_2, \ldots, PM_{\lvert M_1\rvert}\}$
M_2	Набор сборных машин во втором процессе. $M_2 = \{AM_1, AM_2, \ldots, AM_{\lvert M_2\rvert}\}$
E_j	Набор машин, способных обрабатывать компоненты продукта J_j в первом процессе, $E_j \subseteq M_1$
q_{ji}	Количество компонента J_{ji}
a_k	скорость параллельной машины PM_K в первом процессе
P_j	Время сборки продукта J_j во втором процессе

Параметры решения следующие:

$$X_{jiku} = \begin{cases} 1 \text{ Если компонент } J_{ji} \text{ обрабатывается в } u-\text{й части на параллельной машине } PM_k \text{ в первом процессе.} \\ 0 \text{ Другие случаи} \end{cases}$$

$$Y_{jlu} = \begin{cases} 1 \text{ Если продукт } J_j \text{ обрабатывается в } u-\text{й машине сборки } AM_l \text{ во втором процессе.} \\ 0 \text{ Другие случаи} \end{cases}$$

Параметры решения следующие:
S_{ji}: Время начала компонента J_{ji} в первом процессе
C_{ji}: Время завершения компонента J_{ji} в первом процессе
p_{ji}: Время обработки первого процесса J_{ji}
S_j: Время начала продукта J_j во втором процессе
C_j: Время завершения продукта J_j во втором процессе.
$\alpha = 0{\sim}1$: вес принятия решений

Математическая формулировка для планирования, которая одновременно учитывает время завершения и пребывания в производственных процессах, заключается в следующем.

$$min\, f = (1-\alpha)\cdot \max_j\{S_j + P_j\} + \alpha \cdot \sum_{j=1}^{|N|}\sum_{i=1}^{|N_j|}(S_j - S_{ji}) \quad (1)$$

Ограничение:

$$\sum_{j=1}^{|N|}\sum_{i=1}^{|N_j|} X_{jiku} \le 1, k = 1,\dots,|M_1|, u = 1,\dots,N_s \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{|N|} Y_{jlu} \le 1\ , l = 1,\dots,|M_2|, u = 1,\dots,|N| \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{|N|}\sum_{i=1}^{|N_j|} X_{jik(u+1)} \le \sum_{j=1}^{|N|}\sum_{i=1}^{|N_j|} X_{jiku}\ , k = 1,\dots,|M_1|\ , u = 1,\dots,N_s \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{|N|} Y_{jl(u+1)} \le \sum_{j=1}^{|N|} Y_{jlu}\ , l = 1,\dots,|M_2|\ , u = 1,\dots,|N| \quad (5)$$

$$\sum_{u=1}^{Ns}\sum_{k=1}^{|M_1|} X_{jiku} = 1, j = 1,\dots,|N|\ , i = 1,\dots,\left|N_j\right| \quad (6)$$

$$\sum_{u=1}^{|N|}\sum_{l=1}^{|M_2|} Y_{jlu} = 1\ , j = 1,\dots,|N| \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{|N_j|}\sum_{u=1}^{N_s} X_{jiku} = 0, j = 1,\dots,|N|, PM_k \notin E_j \quad (8)$$

$$S_{ji} + \sum_{k=1}^{|M_1|}\sum_{u=1}^{Ns} X_{jiku} q_{ji}/a_k - S_{vt} \le M\left(2 - X_{jiku} - X_{vtk(u+1)}\right)\ ,\ j, v = 1,\dots,|N|, j \ne v, i = 1,\dots,\left|N_j\right|, t = 1,\dots,|N_v|\ , u = 1,\dots,N_s - 1, k = 1,\dots,|M_1| \quad (9)$$

$$S_j + P_j - S_v \le M\left(2 - Y_{jlu} - Y_{vl(u+1)}\right)\ ,\ j, v = 1,\dots,|N|\ , j \ne v\ , l = 1,\dots,|M_2|\ , u = 1,\dots,|N| - 1 \quad (10)$$

$$C_{ji} = S_{ji} + \sum_{k=1}^{|M_1|}\sum_{u=1}^{Ns} X_{jiku} q_{ji}/a_k\ , j = 1,\dots,|N|, i = 1,\dots,\left|N_j\right| \quad (11)$$

$$S_j \ge \max_i\{C_{ji}\}\ , j = 1,\dots,|N|, i = 1,\dots,\left|N_j\right| \quad (12)$$

Генетический алгоритм является глобальной эвристикой, который осуществляется естественным выбором и эволюцией, и широко используется в различных областях [4].

В этой статье мы разработали эвристику для минимизации времени завершения и времени пребывания в производственных процессах и в сочетании с генетическим алгоритмом для решения проблемы планирования в процессе сборки.

Общая блок-схема алгоритма показана на Рисунке 1.



Рисунок 1. Общая блок-схема алгоритма

Алгоритм **LQET** на рис.1 помещает все компоненты на параллельных машинах чтобы минимизировать время завершения и время пребывания из последовательности продукта и помещать продукты в сборку машин. Алгоритм **LQET** работает следующим образом:

Алгоритм **LQET**

$UP := \emptyset$; $G := CH$

For $j := 1$ To $|N|$ Do $ET_j := 0$;

For $k := 1$ TO $|M_1|$ Do $LPM_k := 0$; $AP_k := \{\ \}$; $NPM_k := 0$

For $l := 1$ TO $|M_2|$ Do $LAM_l := 0$; $AJ_l := \{\ \}$;

While $CH \neq \emptyset$ Do

Выберите первый продукт J_j из *CH*.

$UP := N_j$;

While $UP \neq \emptyset$ Do

$i^* := arg\ \max_i \{q_{ji} | J_{ji} \in UP\}$;

Выберите компонент J_{ji^*} из UP.

For каждая машина $PM_k \in E_j$ Do

$C_{ji^*k} := LPM_k + q_{ji^*}/a_k$;

End for

$k^* := arg\ \min_k \{C_{ji^*k} | PM_k \in E_j\}$;

Добавьте J_{ji^*} в AP_{k^*};

$S_{ji^*} := LPM_{k^*}$; $C_{ji^*} := LPM_{k^*} + q_{ji^*}/a_{k^*}$;

$LPM_{k^*} := LPM_{k^*} + q_{ji^*}/a_{k^*}$; $NPM_{k^*} := NPM_{k^*} + 1$;

End while

$$ET_j := max\{C_{ji} | J_{ji} \in N_j\}$$

End while

While $G \neq \emptyset$ Do

$j^* = arg\ \min_j \{ET_j | J_j \in N\}$; Выберите продукт J_{j^*} из G.

$l^* = arg\ \min_l \{LAM_l | PM_l \in M_2\}$;

Добавьте J_{j^*} в AJ_{l^*}

$S_{j^*} := LAM_{l^*}$; $C_{j^*} := LAM_{l^*} + P_{j^*}$;

$LAM_{l^*} := LAM_{l^*} + P_{j^*}$;
End while
For $k := 1$ TO $|M_1|$ Do
For $n := NPM_k - 1$ TO 1 Do
$J_{vt} := AP_k(n+1)$; $J_{v't'} := AP_k(n)$;
$span := min\{S_{v'}, S_{vt}\} - C_{v't'}$;
$S_{v't'} := S_{v't'} + span$;
$C_{v't'} := C_{v't'} + span$;
End for
End for

1. Potts CN, Sevast'Janov SV, Strusevich VA, Van Wassenhove LN и Zwane veld CM. The two-stage assembly scheduling problem: complexity and approximation // European Journal of Operational Research. 1995. № 103. С. 547-556.
2. Yan Zhang, Zhili Zhou и Jiyin Liu. The production scheduling problem in a multi-page invoice printing system. //Computers and Operations Research. 2010. № 37. С.1814–1821.
3. Namakshenas. Bi-level genetic algorithms for a two-stage assembly flow-shop scheduling problem with batch delivery system. //Computers and Industrial Engineering. 2018. №126. С.217–231.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СБОРА АЭРОЗОЛЬНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА

Ким Сын Рёл, Чо Сон Бом, Ли Сон Нам
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
ksr8224@star-co.net.kp

В экологическом обследовании наблюдение за состоянием распределения аэрозолей в атмосфере является важной работой по созданию чистой обстановки в человеческой деятельности. Аэрозоли в атмосфере будут оседать в органах через каналы человеческого дыхания. Количество и положение аэрозоля, осаждаемого через дыхательную систему, зависят от диаметра частиц. Поэтому, если провести пробуждение аэрозоля по гранулограмме и получить распределение размеров, то можно определить, в какой период и в какой степени в залежи была осаждена аэрозольная частица. Аэрозольный гранулометрический анализатор – устройство для классификации аэрозоля по его аэродинамическому диаметру. Аэрозольный гранулометрический анализатор состоит из большого ускоренного сопла и коллекции, а в силу простого проектирования и операции широко используется для оценки аэрозольных характеристик в анализе экологических загрязняющих веществ (пыли, бактерий, вирусов) и фармакологическом применении (всасывание лекарственных веществ в легкие).

Аэрозольный пробный отборник классифицирует на 7 частей аэрозоль 0,1-10 мкм со скоростью потока 28,3 л/мин. Каждая из разделенных границ гранулометрии соответствует диапазону размеров частиц, которые осаждаются по органам в дыхательной системе человека. В исследование проведено сравнение численно рассчитанного диапазона гранулометрии с результатами трехмерной CFD интерпретации, а относительная ошибка составляла в пределах 7%.

1. Введение. Аэрозольный гранулометрический анализатор – это наиболее распространенное устройство для измерения распределения аэрозольных гранулометров. Важным мерилом оценки характеристики аэрозольного гранулометрического анализатора является кривая коэффициента сбора частиц, которая как функция аэродинамического диаметра частиц представляет долю собираемой частицы в каждой из них.

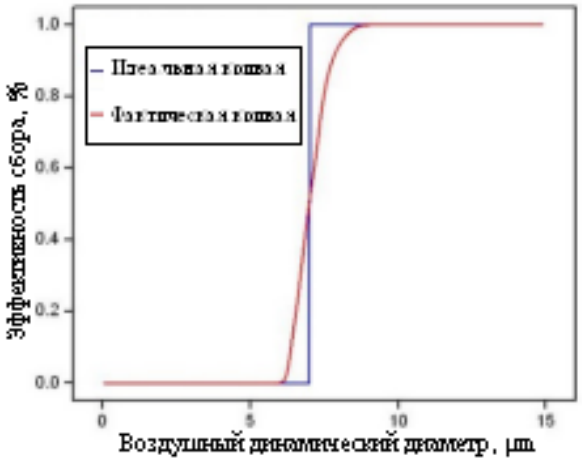


Рисунок 1. Кривая эффективности сбора частиц

Кривая эффективности сбора частиц в идеальном случае является прямой, как показано в Рис. 1. На практике принимается s-образный вид. Следовательно, эффективность сбора частиц привлекает внимание к каждой группе, оценивается диаметром частиц, собираемых на 50%, что называется 50%-ным диаметром отключения, просто диаметром отключения (d50). Поток воздуха, проходящий через сопло, течет между сопловым выходом и коллекцией, при этом большая инерционная частица ударяется о коллекцию, а малоинерционная частица, обходя коллекцию по потоку воздуха, идет в следующий каскад. В следующем каскаде диаметр сопла меньше диаметра всей ступени, поэтому скорость потока воздуха увеличивается, и инерция частиц аэрозоля от него увеличивается. В результате даже частицы, не собранные с передней стороны, будут иметь достаточную инерцию, чтобы столкнуться со следующей коллекцией. Аэрозольный поток в процессе непрерывного потока аэрозольного гранулометрического анализатора будет пробурен в пределах определенной гранулометрии. Таким образом, пробка аэрозоля по гранулометрам позволяет точно оценить степень загрязнения окружающей среды [2, 3].

С углублением исследования аэрозоля проведены многие экспериментальные исследования по оценке характеристики аэрозольного гранулометрического анализатора и улучшению его характеристик. В литературе [1] проведены конструктивные проекты и численные исследования аэрозольных гранулометрических анализаторов на определение распределения размеров аэрозолей, изложены важные фундаментальные принципы. Конструктивный проект и условия работы устройства оказывают большое влияние на характеристики воздушного потока, а точное исследование его позволяет определить рациональные проектные параметры для повышения характеристики аэрозольного гранулометрического анализатора. В литературе [2 ,3] проведена коррекция аэрозольного гранулометрического анализатора и экспериментальное исследование его характеристик. Полученные в эксперименте диаметры отсечки отдельных моносомных ступеней удовлетворяли проектными значениями. В зависимости от различий в проектировании и операциях изменяется распределение собираемой частички, что трудно определить через эксперимент [3].

Имитация вычислительной гидродинамики (CFD) является эффективным методом исследования течения жидкости, ее используют для изучения характеристики потока в аэрозольном гранулометрическом анализаторе. Поэтому в исследование предложены методы трехмерного анализатора аэрозольного гранулометрического анализатора с использованием ansysfluent и сравнительны результаты CFD имитации с литературой.

2. Метод.

2.1. Аналитическая модель CFD

Поток воздуха в аэрозольном гранулометрическом анализаторе является вязким потоком несжимаемого жидкости и может рассматриваться как изотермическое. Движение несжимаемого тела в CFD ими определяется уравнением Наби-Стокса: Для несжимаемого вязкого течения уравнение непрерывности следующее:

$$\nabla \cdot \mathrm{V} = 0 \tag{1}$$

И уравнение количества движения следующее:

$$\rho \frac{\partial \mathrm{V}}{\partial \mathrm{t}} + \rho \nabla \cdot \mathrm{V} = -\nabla P + \rho \mathrm{g} + \nabla \cdot (\tau) \tag{2}$$

Где v – вектор скорости (u, v, w), а ρ плотность жидкости, P статическое давление жидкости, а τ- вязкое напряжение жидкости. Для интерпретации

характеристк течения жидкости аэрозольного гранулометрического анализатора в **Ansys Fluent** целесообразно определить поток воздуха в непрерывную, а поток частиц аэрозоля – дискретную. Поскольку концентрация частиц в потоке воздуха менее 10%, а влиянием движения частиц на поток воздуха и взаимодействием частиц можно пренебречь, то можно интерпретировать методом Лагранжа-Ойлера. Прежде всего, разрешая уравнение Наби-Стокса, получим поле течения жидкости (координата Эйлера), а для этого поля потока – уравнение движения частицы (система координат Лагранжа) и получим траекторию частицы. Траектория аэрозольной частицы в лагранжевой системе координат может быть предсказана, решив уравнение силового равновесия для частицы.

$$m_p \frac{d\mathrm{V}_p}{d\mathrm{t}} = F_D + F_I + F_A \quad (3)$$

$$\frac{d\mathrm{X}_p}{d\mathrm{t}} = \mathrm{V}_p \quad (4)$$

где $\mathrm{m_p}$— масса частицы, а $\mathrm{V_p}$ вектор скорости частицы, $\mathrm{X_p}$— положение частицы. В общем случае, если плотность жидкости очень мала, чем плотность частицы ($\rho/\rho_\mathrm{p} \ll 1$) дополнительные силы - добавочные силы - сила массы и сила разности давлений игнорируются. Кроме того, тепловой расчет не выполняется, поэтому нет сил разности температур, а силы Брауна и Шафмана игнорируются для частиц более 1 1μm, а потому и силы Магнус, так как не учитывают вращения частиц. В результате уравнение равновесия сил частицы упрощается следующим образом.

$$m_p \frac{d\mathrm{V}_p}{d\mathrm{t}} = F_D + F_I \quad (5)$$

Сила сопротивления потоку рассчитывается следующим образом:

$$F_D = \frac{1}{8}\pi\rho d_p^2 C_D (u - u_p)^2 \quad (6)$$

Здесь коэффициент сопротивления потока C_D рассчитывается следующим образом.

$$C_D = \frac{24}{Re_p}(1 + 0.15Re_p^{0.687}) \quad (7)$$

Инерционные силы рассчитываются следующим образом.

$$F_I = \rho_p \frac{\pi}{6} d_p^3 \frac{u_p^2}{r_p} \quad (8)$$

где $\mathrm{r_p}$- радиус аэрозольной частицы, а $\mathrm{u_p}$- скорость частицы. С учетом особенностей, что режим течения в аэрозолилоновом гранулометрическом анализаторе в основном переходный и сильно измененный поток воздуха, в качестве модели турбулентного потока выбрана модель realizable k-ε.

2.2. Расчетная модель и разделение сетки

Геометрические размеры, использованные в имитации, приведены в Таблице 1. В аэрозольном гранулометрическом анализаторе число однозвездных сопел составляет 96-400, что обеспечивает достаточную скорость потока для частиц, поддерживая условия ламинарного течения жидкости. Коллекция дисковая диаметром 8.2 см, расстояние между коллекторами (S) от выхода сопла 2 мм для всех ступеней.

Таблица 1 – Геометрические размеры расчетной модели

	ступень					
	1	2	3	4	5	6
диаметр сопла W (mm)	2.5	1.8	0.8	0.7	0.5	0.3
длина сопла L (mm)	4.2	4.2	1.4	1.6	1.6	1.2

Аэрозольный гранулометрический анализатор состоит из шести ступеней, но расчетная модель делилась на отрезок a, состоящий из 1 и 2 единиц A, а из 3 и 4 частей B, а также на отрезок b из 2 ,3 C и имитировалась отдельно для каждого фрагмента. Для обеспечения устойчивости и сходимости численного расчета CFD качество расчетной сетки оказывает существенное воздействие. Здесь методом построения сетки-конфигурации с использованием Gambit проводили разделение сетки расчетной модели.

3. Результаты и обсуждение.

3.1. Воздушный поток

Рис. 2 показывает распределение поля скоростного потока аналитической модели при

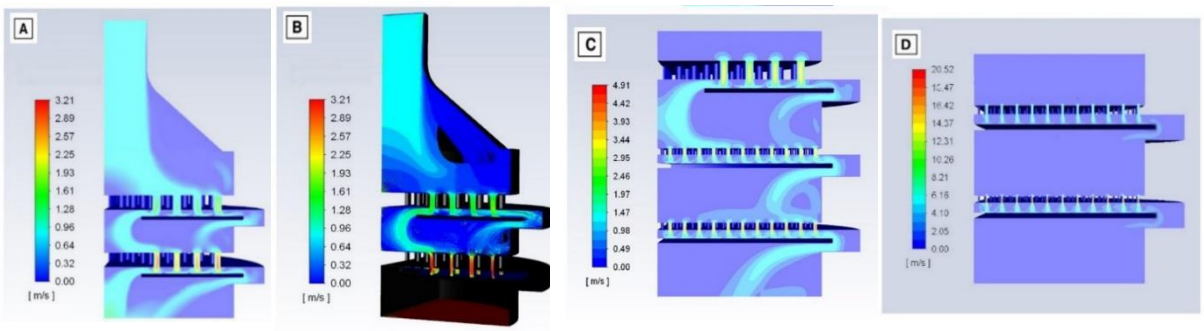


Рисунок 2. Поле скоростного потока модели CFD(A - отрезок ; B - движение частицы диаметром 9 мкм на отрезке A; C - отрезок B; D - отрезок C)

скорости потока 28.3 л/мин. В первую очередь, для всех ступеней поток воздуха после прохождения сопла вблизи коллекции измененяет направление на 90°. С угла коллекции ломать на 180°. Наблюдается рециркуляционный вихревой поток в пространстве между сопловым выходом и коллектором, между банками и между банками, между углами коллекции и наружной стеной. Эти рециркуляционные вихревые потоки препятствуют оттоку воздуха и увеличивают осаждение частиц на стенках, что влияет на особенности сбора аэрозоля. Обычно зоны, в которых сосредоточены воздушные потоки или сильно изменены в направлении потока, оказывают большое влияние на сбор аэрозоля. Отверстия в центре первой и второй коллекций, как видно из Рис. 2, приводят к сильному изменению в направлении потока, что улучшает характеристики потока воздуха.

3.2. Запас частиц

Кривая эффективности сбора частиц каждой монотонной величины определяется как доля частиц, собранных в коллекцию для общего числа частиц, входящих в вход модели. В исследование для каждого размера частиц коэффициент сбора рассчитывается следующим образом.

$$\eta(\%) = \frac{n_d}{n_i} \times 100 \qquad (7)$$

Здесь η коэффициент сбора частиц, n_i общее число падающих частиц, n_d число собранных в коллекцию. Рис. 3 показывает по одному критерию кривые эффективности сбора частиц, полученные из эксперимента литературы [1], трехмерной CFD-анализа и двухмерной CFD-анализа литературы [2]. Как уже говорилось выше, оценка мощности аэрозольного анализатора имеет диаметр отключения, а диаметр отключения, полученный через CFD интерпретацию, как видно из Рис. 3d, сравнивается с результатами эксперимента литературы [1]. Результаты трехмерной CFD-анализации для всех групп находятся в пределах 7%. Относительная погрешность для 1-3 и 5 ступеней составляет не более 3%, в

частности, 3 - 0.52%, что правильно имитировало диаметр блокировки для каждой из рассматриваемых моделей CFD работы.

Двухмерная CFD-идеология литературы [2] более точно предусмотрела теоретически рассчитанный диаметр отключения и получила кривую эффективности сбора острых частиц. Однако не отражено явление, проявляющееся в реальных устройствах, таких как поперечное взаимодействие потока между распыляемыми струями в соплах, рециркуляционный вихревой поток, осаждение частиц на стенки, в результате чего относительная погрешность соотносится с результатами эксперимента литературы [1]. В частности, относительная ошибка в трех группах составляет 20.2%. Три группы являются первой частью, в которой число соплетов составляет 400, и причина большой относительной погрешности связана с влиянием эффекта поперечного течения за счет увеличения числа сопла, так как в двухмерном CFD-анализе она не отражена. В результате показано, что трехмерная модель CFD в исследование точно предугадала диаметр отсечки каждой ступени при скорости потока 28.3 л/мин и хорошо отражает характеристики реального аэрозольного анализатора.

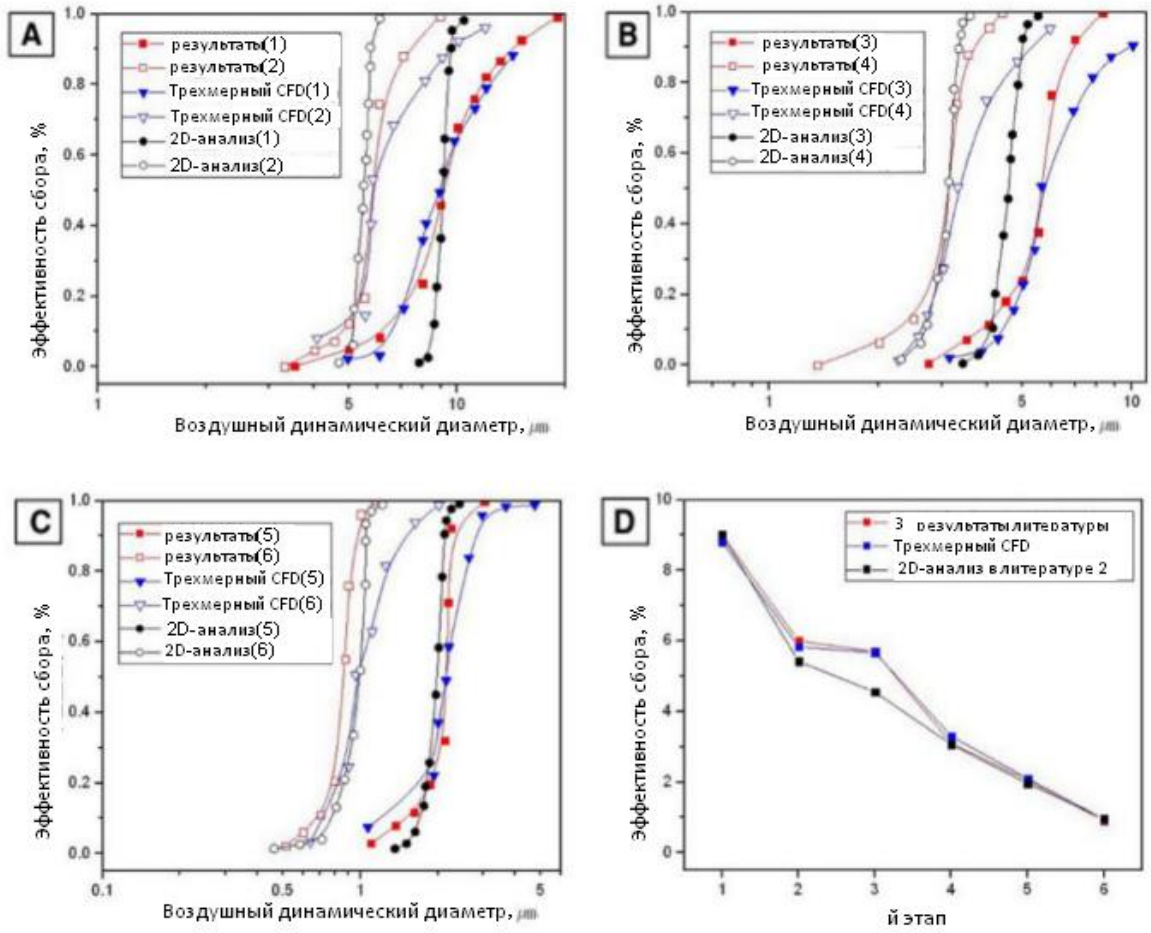


Рисунок 3. Сравнение кривых эффективности сбора частиц и диаметра(A, B и C кривые эффективности сбора; D - сравнение диаметров отсечения)

4. Заключение. В исследовании предложены методы трехмерного анализатора аэрозольного гранулометрического анализатора с использованием **Ansys Fluent** и сравнительны результаты CFD имитации с литературой. Проверка результатов CFD анализатора работы хорошо согласуется с разными документами, и показано, что

трехмерная модель анализатора CFD более точно отражает реальную характеристику потока в аэрозольном гранулометрическом анализаторе. Для получения более острой кривой коллекции из результатов анализа CFD подтверждено, что число Рейнольдса в сопло должно быть $100 \leq Re \leq 300$ И, а отношение длины сопла к диаметру сопла $0.5 \leq S/W \leq 5$, параметр поперечного течения должен быть равен $X_c \leq 1.2$. Ограниченность работы заключается в том, что имитация отдельных фрагментов для уменьшения расчетной нагрузки компьютера не была точно отражена в режиме воздушного потока на входе. Эти исследования имеют важное значение для улучшения характеристики аэрозольного анализатора, необходимого для оценки загрязнения окружающей среды, и разработки нового устройства.

1. О.М. Заславская, Рециклинг в литье по выплавляемым моделям. Вестник УрГУ, № 39, 2012.137-138
2. Balachandran, W., Kulon, J., Koolpiruck, D., Dawson, Burnel, P., 2003. Bipolar charge measurement of pharmaceutical powders. Powder Technology, 135–136, 156–163.
3. Garmise, R.J., Hickey, A.J., 2008. Calibration of the Andersen cascade impactor for the characterization of nasal products, J. Pharm.Sci. 97(8), 3462–3466.

МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЦЕЛЕВОГО РЕАКТОРА

Ким Хак Чхор, Ким Ен Хо, Ли Ын Сим
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
rus89115@star-co.net.kp

В этой статье рассматривается проблема планирования для минимизации потребления энергии в химической инженерии с использованием многоцелевых реакторов. В отличие от предыдущих документов, мы ввели новые двоичные переменные и добавили ограничения для представления непрерывности процесса. Цельная функция – минимизировать энергию, потраченную на весь процесс.

Энергия состоит из трех предметов:

- Энергия, потребляемая во время подготовки к производству
- Энергия, потребляемая во время производства
- Энергия, потребляемая в хранении материалов.

Потребляемая энергия состоит из суммы трех энергий.

До математической композиции давайте назначим следующие символы.

Множество/Индекс

J/j	Реактор
I/i	Задача
S/s	Состояние материи
T/t	Момент
I_j	Задачи, которые могут быть обработаны в реакторе(j)
J_i	Реакторы, которые могут обрабатывать задачу(i)
I_s^p	Задачи, которые генерируют материал(s)
I_s^c	Задачи, которые потребляют материал(s)

Параметры

ρ_{is}^p	Коэффициент, в котором задача(i) производит материал(s)
ρ_{is}^s	Коэффициент, в котором задача(i) потребляет материал(s)
d_{st}	Количество материала(s), требуемого в точке(t)
HE_s	Энергия, которая должна хранить материал(s) в единицу времени
PE_{ij}	Энергия, необходимая для обработки задачу(i) в качестве единицы в реакторе(j)
RE_{ij}	Энергия, которая будет готова к обработке задачи(i) в реакторе(j)
pt_{ij}	Время, которое я обрабатываю задача(i) в реакторе(j)
α_{is}	Время, когда задача(i) выпускает материал(s)
$V_{ij}^{\min}$	Минимальная мощность реактора(j), которая может обрабатывать задачу (i)
$V_{ij}^{\max}$	Максимальная мощность реактора(j), которая может обрабатывать задачу(i)
$ST_s^{\max}$	Максимальное количество хранения материала(s)
ST_s^0	Первоначальное количество материала(s)

Переменная решения

W_{ijt} Двоичная переменная. Если реактор(j) обрабатывает задачу(i) в точке(t), это значение составляет 1.

Y_{ijt} Двоичная переменная. Если процесс задачи(i) продолжается в реакторе(j) в точке(t), это значение составляет 1.

V_{ijt} Количество, в котором реактор(j) обрабатывает задачу(i) в точке(t)

ST_{st} Хранение материала(s) в точке(t)

$$\sum_{t\in T}\sum_{j\in J}\sum_{i\in I_j}(PE_{ij}V_{ijt}+RE_{ij}(1-Y_{ijt}))+\sum_{t\in T}\sum_{s\in S}HE_sST_{st}\to\min \tag{1}$$

$$\sum_{i\in I_j}W_{ijt}\le 1,\forall j\in J,t\in T \tag{2}$$

$$\sum_{i'\in I_j}\sum_{t'=t}^{t+pt_{ij}-1}W_{i'jt'}-1\le M(1-W_{ijt}),\forall j\in J,i\in I_j,t\in T \tag{3}$$

$$W_{ijt}V_{ij}^{\min}\le V_{ijt}\le W_{ijt}V_{ij}^{\max},\forall j\in J,i\in I_j,t\in T \tag{4}$$

$$W_{ijt}+W_{ij,(t-pt_{ij})}\ge 2Y_{ijt},\forall j\in J,i\in I_j,t\in T \tag{5}$$

$$ST_{st}=ST_{s,(t-1)}+\sum_{i\in I_s^p}\rho_{is}^p\sum_{j\in J_i}V_{ij,(t-pt_{ij})}-\sum_{i\in I_s^c}\rho_{is}^c\sum_{j\in J_i}V_{ijt}-d_{st},\forall s\in S,t\in T \tag{6}$$

$$0\le ST_{st}\le ST_s^{\max},\forall s\in S,t\in T \tag{7}$$

$$ST_{s0}=ST_s^0,\forall s\in S \tag{8}$$

$$W_{ijt}\in\{0,1\},Y_{ijt}\in\{0,1\},V_{ijt}\ge 0,\forall i\in I,\ j\in J,t\in T \tag{9}$$

Объективная функция (1) означает минимизацию общей суммы энергии, потребляемой во время подготовки производства, энергии, потребляемой во время производства, и энергии на хранении. Ограничение (2) является ограничением, что один реактор должен иметь дело с одной задачей в точке времени. Ограничение (3) является ограничением, что реактор не может выполнять другую задачу до тех пор, пока он не будет завершен, как только он начинает задачу. Ограничение (4) представляет собой минимальное и максимальное ограничение пропускной способности. Ограничение (5) представляет собой ограничение на непрерывность процесса. Уравнение (6) представляет собой ограничение на баланс материала. Ограничение (7) – (8) дает ограничения и начальные значения для хранения материалов. Ограничение (9) дает область значений переменных.

Мы хотим определить следующие количества через планирование.

– Выбор реактора для обработки каждой задачи

– Время начала и время завершения каждой задачи

– Количество материалов, которые должны быть обработаны в каждой задаче.

Для введения в производственный процесс мы построили систему поддержки планирования процесса C++. Для получения решения модели мы использовали функции C++ API, поддерживаемые CPLEX12.10. В таблице 1 показано потребление энергии после введения обычного потребления энергии и предлагаемого метода в пяти процессах синтеза материалов.

В результате принятия средняя мощность энергии снизилась на 10.2%.

Таблица 1 – Сравнение прежних и текущих потребностей в энергии

Продукция	До внедрения(kW•h/kg)	После внедрения(kW•h/kg)
Изонизид	186.9	168.95
Дихлорбензол	19.47	16.11
Никокотинская	57.65	52.55
Хлорид калия	35.28	30.88
Хлорид кальция	31.44	28.6

Мы будем развивать эффективный алгоритм для решения крупномасштабных проблем в будущем.

1. Е. Н. Остроух. К вопросу эффективности методов и алгоритмов решения оптимизационных задач с учетом специфики целевой функции // Вестник Донского государственного технического университета**.** 2019. Т. 19. № 1. С. 81–85.
2. Floudas C.A. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review // Computers and Chemical Engineering**.** 2004. 28. pp. 2109-2129.
3. Kumar V. Improved scheduling model for a multistage biopharmaceutical process in a multiproduct facility // Chemical Engineering Research and Design. 2024. 207. pp. 518−538.
4. Adekola O. Unified Approach for the Optimization of Energy and Water in Multipurpose Batch Plants Using a Flexible Scheduling Framework // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2013. 52. pp. 8488−8506.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАКЦИИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ким Чхоль Гук, Ли Ын Сим, Чой Гван Мен
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
rus89115@star-co.net.kp

В моделировании химической процессов с использованием Aspen Plus, Точное определение энергии активации и частотного фактора в качестве параметров ввода в качестве параметра реакции играет очень важную роль в создании модели, аналогичной фактическому процессу.

Основной целью этой статьи является оптимальное определение параметров реакции химических реакций с использованием схемы моделирования.

1. Анализ производственного процесса и Симуляция моделирования.

Используя Aspen Plus, следует создать модель, которая идентична процессу, и определить оптимизацию моделирования.

Важно определить энергию активации и частотные факторы химической реакции. Процесс изонизида является подсистемой, такой как процесс амидного процесса, процесс конденсации гидразина, процесс очистки, сушки и упаковки, который должен быть смоделирован для определения параметров, выполняя моделирование для каждого процесса суб-процесса. Мы представляем обзор процесса амидного процесса.

Моделирование процесса изонизидного процесса с использованием Aspen Plus происходит следующим образом:

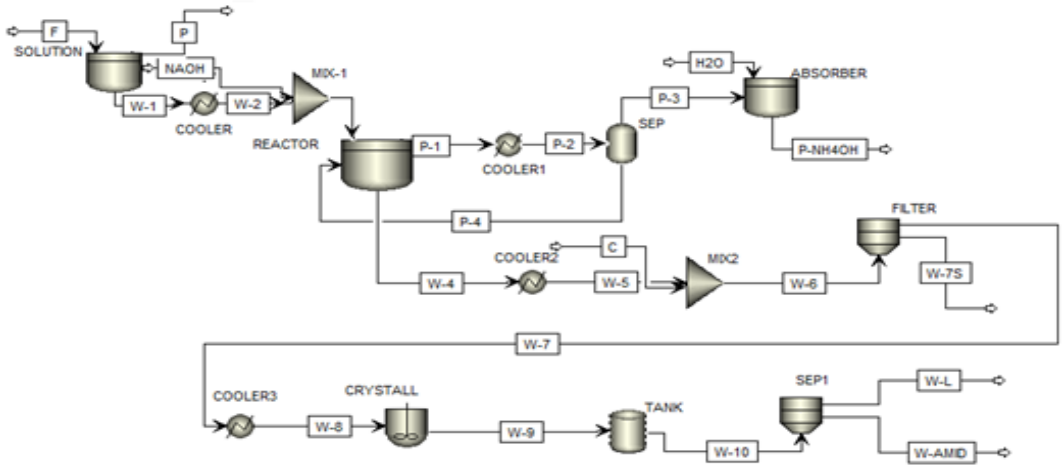


Рисунок 1. Модель процесса амидного процесса

Вход ввода для моделирования амидного процесса следующий:

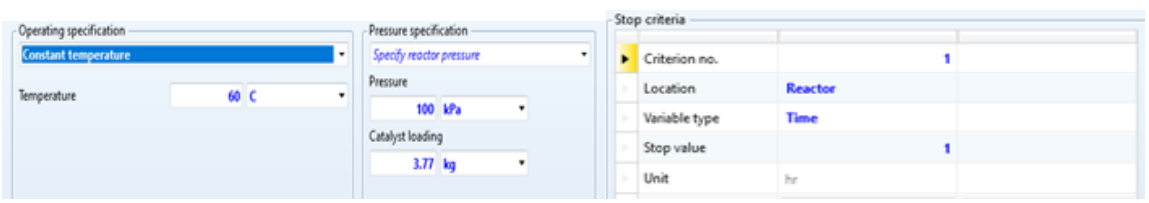


Рисунок 2. Температура реакции, условия катализатора и время реакции

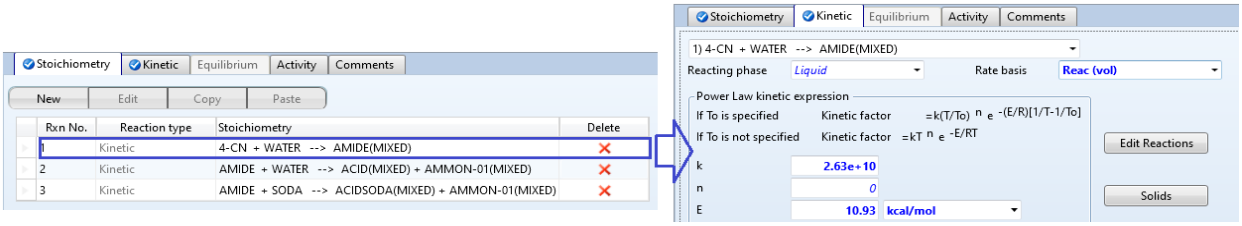


Рисунок 3. Постоянный вход скорости, соответствующий уравнению реакции и формулы реакции

Используя схему моделирования, изменяя условия ввода моделирования, нам необходимо сделать с той же моделью, что и реальная система.

2. Определение энергии активации и факторов частоты путем моделирования.

Установка на два уровня для каждого фактора выглядит следующим образом:

Фактор / Уровень	Параметры скорости химической реакции						Состояние сырья	
	Основная реакция		Негативная реакция 1		Негативная реакция 2		4-CN	H_2O
	$K_0(X_1)$	$E(X_2)$	$K_0(X_3)$	$E(X_4)$	$K_0(X_5)$	$E(X_6)$	(X_7)	(X_8)
Высокий уровень(+1)	12.4	2.7e+10	55.7	3.9e+10	13.9	1.1e+10	204	405
Низкий уровень(-1)	10.9	2.6e+10	52.2	3.5e+10	13.4	1.0e+10	196	396

Если взаимодействие между переменными существует только X_1, X_2, X_3 и X_4, X_5 и X_6, X_7 и X_8, модель регрессии для амидных и плавильных точек, полученных полной ортогональной конфигурацией, может быть представлена следующим образом:

$$y_{1모} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4 + \beta_5 x_5 + \\ + \beta_6 x_6 + \beta_{56} x_5 x_6 + \beta_7 x_7 + \beta_8 x_8 + \beta_{78} x_7 x_8 \quad (2\text{-}1)$$

$$y_{2모} = \beta'_0 + \beta'_1 x_1 + \beta'_2 x_2 + \beta'_{12} x_1 x_2 + \beta'_3 x_3 + \beta'_4 x_4 + \beta'_{34} x_3 x_4 + \beta'_5 x_5 + \\ \beta'_6 x_6 + \beta'_{56} x_5 x_6 + \beta'_7 x_7 + \beta'_8 x_8 + \beta'_{78} x_7 x_8 \quad (2\text{-}2)$$

При создании таблицы матрицы и получения параметров получены регрессии для амидных и плавильных точек.

Следовательно, модель оптимизации для определения оптимальных параметров является следующим образом.

объективная функция: $min\, f\,(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{128} (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2$ (2-3)

Ограничение: $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \in$ [-1, 1] (2-4)

При получении оптимального решения можно получить значение K0 = 10, E = 2.6E + 10 в основной реакции, k = 53,7 для отрицательной реакции 1, E = 3,5E + 10, k 0 = 13,4 и E = 1,1E + 10 для отрицательной реакции 2.

3. Анализ результатов.

No	Вход в симуляцию				Результаты моделирования и реальной системы			
					Амидная доза (kg)		Точка плавления(℃)	
	4-CN (kg)	NaOH (kg)	H_2O (kg)	C (kg)	Фактическое значение	Симуля-ционные значения	Фактичес-кое значение	Симуля-ционные значения
1	193	3.76	396.7	0.45	203.82	198.03	152.6	156.27
2	194.7	3.48	404.9	0.46	206.18	200.34	154.42	153.46
…	…	…	…	…	…	…	…	…
10	193.3	3.64	398.8	0.51	204.36	198.56	151.42	152.44
Относительная ошибка					2.1%		1.2%	

1. Дома А Искусство Aspen Plus в течение 24 часов Компьютерная поддержка химической инженерии, 2019.
2. R.E. Мардаришёйли Кинетическая параметрическая оценка каталитических реакций и параллельных отравлений, Использование катализаторов, 2017.
3. Тяки Расширенное моделирование газификации биомассы в реакторе псевдосжиженного слоя с использованием Aspen Plus, Елсэбиэ, 2017.

РЕШЕНИЕ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ ЯНГА-БАКСТЕРА ДЛЯ МАТРИЦЫ С ТРЕМЯ РАЗЛИЧНЫМИ СОБСТВЕННЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ

Ким Юн Ми, Ли Кван, Чве Мен Су
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
kym8495@star-co.net.kp
lkg8385@star-co.net.kp
cms6598@star-co.net.kp

Мы изучаем метод поиска решения матричным уравнением Ян-Бакстера для диагональной матрицы с тремя различными собственными значениями, удовлетворяющими $A^3=-A$.

Когда A считают матрицей комплексных чисел $n\times n$, следующее уравнение вторичной матрицы называют матричным уравнением Янга-Бакстера.

$$AXA=XAX \qquad (1)$$

Уравнение(1) основано на классическом уравнении Янга-Бакстера, впервые указанном в статистической физике в 1967-ом году. Это уравнение широко используется в разнообразных разделах математики и физики: в статистической механике, квантовой теории, дифференциальном уравнении и теории узлов.

Пусть A – матрицей комплексных чисел $n\times n$. $A^3=-A$, так что многочлен $p(\lambda)=\lambda(\lambda-i)(\lambda+i)$ является аннулятором для A, т.е $p(A)=0$

Следовательно, собственные значения при A образуют подмножество множества $\{0,i,-i\}$, минимальный многочлен g(λ) при A является единственным аннулятором при A, где коэффициент члена, имеющий максимальную степень– 1, и делителем при $p(\lambda)$.

Отсюда собственные значения для A являются полупростыми и при этом A – возможная матрица, в которой возможна диагонализация.

Так как невырожденная матрица S существует, $A=SJS^{-1}$, где $J=\operatorname{diag}(\lambda_1 I_{m_1},\ldots,\lambda_r I_{m_r})$, $\lambda_j\in\{0,i,-i\}$, $j=1,2,\ldots,r$, и каждый I_{m_j} $(j=1,2,\ldots,r)$ обозначает единичную матрицу.

Если $Y=S^{-1}XS$, очевидно, Y должен быть решением управления $JYJ=YJY$ (2) для того, чтобы X стало решением управления (1).

Поэтому решают управление (2), чтобы найти решение управления (1)

При этом мы разделяем матрицу A на несколько случаев и рассматриваем управление (1) в каждом случае.

В некотором случае для минимального многочлена матрицы A ясно решение, так что нужно рассмотреть только несколько случаев.

Случай 1. Минимальный многочлен матрицы A-$g(\lambda)=\lambda(\lambda-i)$.

Случай 2. Минимальный многочлен матрицы A-$g(\lambda)=\lambda(\lambda+i)$.

Случай 3. Минимальный многочлен матрицы A-$g(\lambda)=(\lambda-i)(\lambda+i)$.

Случай 4. Минимальный многочлен матрицы A-$g(\lambda)=\lambda(\lambda-i)(\lambda+i)$.

Мы вводим только случай 4, когда матрица A имеет три разных собственных значения.

Будем считать, что в этом случае A – невырожденной матрицей, где собственное значение – i, $-i$, 0, и и её ранг – m.

Если k является кратностью собственного значения, то $J=\operatorname{diag}\{i\boldsymbol{I}_k, -i\boldsymbol{I}_{m-k}, 0\}$ – это является жордановой формой для A

При этом все коммутативные решения управления (1) имеет следующий вид, где M – любая матрица (n-m)×(n-m), B – матрица k×k, удовлетворяющая $B^2 = iB$ и D – матрица (m-k)×(m-k), удовлетворяющая $D^2 = -iD$

$$X = S\,\mathrm{diag}\{B, D, M\}S^{-1}$$

А также все некоммутативные решения управления (1) имеют следующий вид, где B – матрица, в которой возможна любая диагонализация k×k, D – матрица, в которой возможна любая диагонализация (m-k)×(m-k), они удовлетворяют следующее управление и имеющая следующий характер.

$$\begin{cases} -B = iB^2 - iNL \\ N = iBN - iND \\ L = iKB - iDL \\ -D = -iD^2 + iLN \end{cases} \qquad (3)$$

$$X = S\begin{pmatrix} B & N & H_1 \\ L & D & H_2 \\ K_1 & K_2 & M \end{pmatrix}S^{-1}$$

– Ранг ненулевой матрицы $\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{L}$ является r, $NLN = -\frac{3}{4}N$, и $LNL = -\frac{3}{4}L$

– B и D имеют собственные значения -i/2 и i/2, кратность которых – r

– Ненулевые столбцы при N и ненулевые строки при L являются собственными векторами и левыми собственными векторами при B, соответствующими собственному значению -i/2.

– Другие собственные значения для B — 0 или i, а другие собственные значения для D — 0 или i .И любой ненулевый вектор-столбец h=(h1T, h2T)T матрицы (H1T, H2T)T m×(n-m) и любая ненулевая вектор-строка k=(k1, k2) являются собственным вектором и левым собственным вектором матриц $\begin{pmatrix} iB & -iN \\ iL & -iD \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} iB & -iN \\ iL & -iD \end{pmatrix}$ а, M – матрицей m×(n-m).

1. D. Shen and M. Wei, All solutions of the Yang-Baxter-like matrix equation for diagonalizable coefficient matrix with two different eigenvalues, Appl. Math. Lett. 101 (2020), 106048, DOI: 10.1016/j.aml.2019.106048.

2. Q. Huang, M. S. I. Adam, J. Ding ,L. Zhu, all non–commuting solutions of the yang–baxter matrix equation for a class of diagonalizable matrices, Operators and matrices. 13 (2019), 187–195.

3. D. Zhou, G. Chen, and J. Ding, Solving the Yang-Baxter-like matrix equation for rank-two matrices, J. Comput. Appl. Math. 313 (2017) 142–151.

4. D. Shen, M. Wei, Z. Jia, On commuting solutions of the Yang–Baxter-like matrix equation, J. Math. Anal. Appl. 462 (2018) 665–696.

5. D. Zhou, J. Ding, All Solutions of the Yang–Baxter-Like Matrix Equation for Nilpotent Matrices of Index Two, Complexity, (2020) Article ID 2585602, 1–7.

ВНЕДРНЕНИЕ БАЗОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ РЕКОМЕНДАЦИИ ВЕБ-СЕРВИСОВ ДЛЯ ГЕОПОРТАЛА

М. С. Климонов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН

Геопортал ИДСТУ СО РАН предоставляет пользователям доступ к уникальным геопространственным данным и веб-сервисам стандарта OGC WPS. Помимо простого запуска сервисов, на портале реализована система построения композиций (workflow) из нескольких сервисов. Для поиска и использования таких сервисов необходимо не только индексировать их характеристики, но и предлагать пользователям наиболее подходящие сервисы в конкретном контексте [1]. Данная работа развивает идею рекомендации и описывает экспериментальное сравнение двух базовых моделей для рекомендации следующего веб-сервиса (последовательности): частотного подхода (Popularity) и классического алгоритма случайного леса (RandomForest).

В качестве исходных данных использовалась структура DAG (направленный ациклический граф), в котором узлы обозначают либо веб-сервисы, либо промежуточные таблицы, а рёбра определяют порядок вызова сервисов. Граф, содержит 50 узлов и 97 рёбер. Из этого графа извлекались все простые пути (228 последовательностей различной длины). Каждый путь разбивался на обучающие примеры вида (контекст → следующий сервис), где контекст представляет собой последовательность ранее вызванных сервисов. Всего было сформировано 107 примеров (74 — обучение и 33 — тестирование). Для оценки качества использовались метрики Accuracy, F1-score, Precision, Recall и nDCG.

Данные разделялись на обучающую и тестовую выборки стратифицированно, чтобы сохранить одинаковое распределение классов. Доля тестовой выборки составила 30 %, а для RandomForest дополнительно применялась 5-кратная кросс-валидация для подбора параметров. Модели сравнивались по нескольким метрикам. Важной стала nDCG (normalized Discounted Cumulative Gain), так как она оценивает качество ранжирования: учитывается не только факт попадания правильного сервиса, но и его позиция в списке.

Модель	Accuracy	F1-score	Precision	Recall	nDCG
RandomForest	0.4848	0.3712	0.3300	0.5000	0.7742
Popularity	0.2727	0.1071	0.0682	0.2500	0.6513

Результаты показывают, что даже простые методы способны формировать полезные рекомендации. Модель RandomForest, основанная на учёте уже вызванных сервисов, достигла почти 48 % точности и nDCG ≈ 0,77 базовый частотный подход демонстрирует существенно меньшую точность 27 %, но всё же обеспечивает приемлемое ранжирование за счёт nDCG ≈ 0,65: популярные сервисы действительно часто востребованы, поэтому правильный сервис нередко оказывается в верхних позициях. Примечательно, что обе модели добиваются высоких значений nDCG, что важно для практических систем рекомендаций, где критична не только точность, но и качество ранжирования.

Следует учитывать, что результаты получены на небольшом наборе данных; при увеличении числа последовательностей и разнообразия сервисов точность и стабильность моделей могут существенно измениться. Даже в нынешних условиях

базовые модели уже предлагают полезные рекомендации, что подтверждает целесообразность дальнейшего развития и расширения датасета.

Однако для получения более качественных рекомендаций необходим переход к моделям, учитывающим структуру графа и порядок вызовов: Graph Neural Networks (GCN, DAGNN, GraphSAGE) и Sequential Neural Networks (SASRec, Caser, GRU4Rec). Также важно увеличить датасет путей и признаков: включить текстовые, ссылочные и поведенческие характеристики сервисов.

1. Климонов, М. С. Разработка поисковой системы для геопортала / М. С. Климонов // Ляпуновские чтения 2023 : Материалы 39-й международной конференции, Иркутск, 04–08 декабря 2023 года. – Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 40.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА СТАДИИ НАГРЕВА РЕАКЦИОННОЙ СМЕСИ В ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ СТИРОЛА

В. Ю. Кобозев, А. Л. Истомин, А. Г. Колмогоров, М. В. Кривов
Ангарский государственный технический университет
Vladimir-kobozeff@yandex.ru

Процесс полимеризации стирола в периодических реакторах относится к числу сложных химико-технологических операций, требующих высокой точности управления температурным режимом. Это обусловлено как экзотермическим характером реакции, так и чувствительностью конечного продукта — полистирола — к условиям проведения процесса. Неправильно выбранный температурный профиль может привести к снижению качества полимера, образованию побочных продуктов, а в крайних случаях — к аварийным ситуациям, связанным с термическим разгоном реакции. В связи с этим разработка и внедрение систем оптимального управления стадиями нагрева представляют собой актуальную научно-техническую задачу, направленную на повышение эффективности, безопасности и устойчивости производства.

Процесс полимеризации стирола условно можно разделить на три ключевые стадии: предварительный нагрев реакционной массы до заданной температуры инициирования, изотермический режим полимеризации и охлаждение готового продукта. Наибольшее внимание следует уделить первой стадии — нагреву, поскольку именно на этом этапе закладываются условия для стабильного протекания последующей экзотермической реакции.

Для описания динамики процесса используется математическая модель, включающая уравнения теплового баланса реактора и кинетические зависимости скорости полимеризации от температуры и концентрации мономера. Учёт динамики теплопередачи между теплоносителем (обычно паром или термостатирующей жидкостью) и реакционной смесью позволяет адекватно отразить инерционные свойства системы. В качестве управляющего воздействия выступает температура теплоносителя или расход пара, подаваемого в рубашку реактора.

$$\begin{cases} \dfrac{dT_k}{dt} = \dfrac{v_p I}{V_p \rho_k c_{\rho k}} - \dfrac{v_k T_k}{V_p} + \dfrac{k_{ks} F}{V_p \rho_k c_{\rho k}} (T_s - T_k), \\ \dfrac{dT_s}{dt} = \dfrac{k_{ks} F}{V_s \rho_s c_{\rho s}} (T_k - T_s) + \dfrac{k_{sr} F}{V_s \rho_s c_{\rho s}} (T_r - T_s), \\ \dfrac{dT_r}{dt} = \dfrac{k_{sr} F}{V_r \rho_r c_{\rho r}} (T_s - T_r), \end{cases}$$

где v_p и v_k – объемные расходы пара и конденсата, соответственно, м^3/с; I – энтальпия пара, кДж/кг; k_{ks} и k_{sr} – коэффициенты теплоотдачи от конденсата к стенке и от стенки к реакционной смеси, кДж/(м$^2\cdot{}^0$С·с); F – поверхность теплообмена, м^2; V_p, V_s и V_r – объемы паровой рубашки, стенки и сырья в реакторе, соответственно, м^3; ρ_k, ρ_s и ρ_r – плотности конденсата, стенки и сырья в реакторе, соответственно, кг/м^3; $c_{\rho k}$, $c_{\rho s}$ и $c_{\rho r}$ – удельные теплоемкости конденсата, стенки и сырья, соответственно, кДж/(кг$\cdot{}^0$С).

Критерием оптимальности при управлении стадией нагрева служит минимальное время достижения заданной температуры инициирования при соблюдении ряда ограничений. Эти ограничения включают:

– предельно допустимую скорость нагрева, чтобы избежать локальных перегревов и преждевременного начала реакции;

– максимальную температуру стенки реактора для обеспечения его прочности и безопасности;

– ограничения на управляющее воздействие, обусловленные техническими возможностями системы подачи теплоносителя.

Решение задачи оптимального управления строится с использованием принципа максимума Понтрягина. Анализ сопряжённых уравнений и гамильтониана позволяет установить структуру оптимального управления. Как показано в работе [1], оптимальная стратегия нагрева имеет релейный характер: на начальном этапе подаётся максимальная мощность нагрева (максимальная температура теплоносителя), при достижении заданной температуры реакционной смеси нагрев отключается. (см. рис. 1).

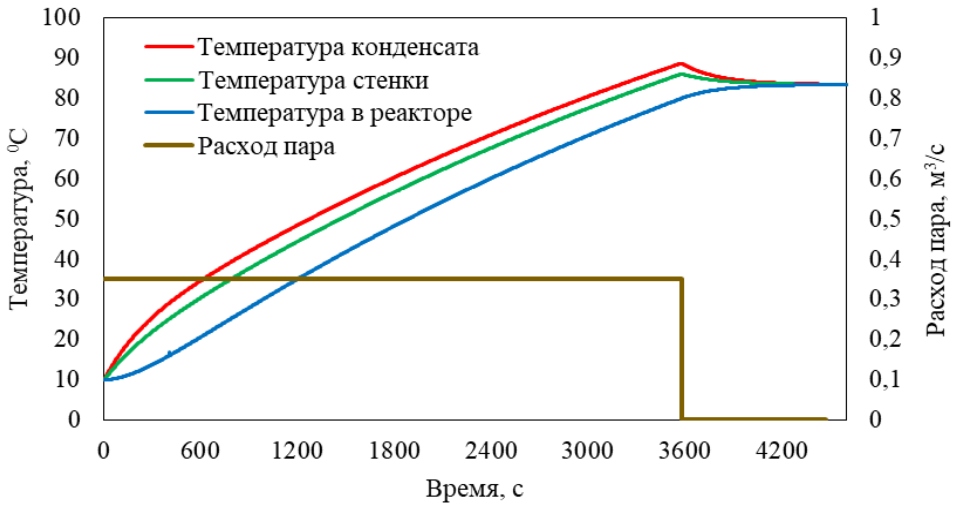


Рисунок 1. Графики температур и оптимального управления

Практическая значимость работы заключается в возможности повышения производительности реактора за счёт сокращения длительности вспомогательных операций, а также в обеспечении стабильного качества выпускаемого полистирола. Внедрение подобных алгоритмов в системы автоматизированного управления технологическими процессами (АСУ ТП) позволяет перейти от ручного или полуавтоматического режима к полностью автоматизированному и оптимизированному производству.

1. Истомин А.Л., Кобозев В.Ю., Кривов М.В., Колмогоров А.Г. Исследование задачи оптимального нагрева жидкого продукта жидким теплоносителем в емкости с рубашкой // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 1. С. 7-16.
2. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
3. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. 4-е издание, - М.: Наука, 1983. – 392 с.
4. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1969. – 408 с.

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОБУЛЕВЫХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ОБРАЩЕНИЯ MD4*

В. С. Кондратьев, И. А. Грибанова
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
vikseko@gmail.com

Метод сведения к задаче проверки булевой выполнимости (SAT) является мощным инструментом для решения сложных комбинаторных задач. Современные SAT-решатели на основе алгоритма Conflict-Driven Clause Learning (CDCL) [1] успешно применяются в различных областях, включая криптографию [2]. Однако многие практические задачи порождают экземпляры SAT, которые оказываются исключительно трудными для последовательных решателей. Это делает актуальным развитие методов параллельного решения SAT, основанных на декомпозиции исходной задачи [3].

В настоящей работе развивается подход к распараллеливанию трудных примеров SAT с использованием, так называемых, псевдобулевых интервалов, ранее успешно апробированный для задач проверки эквивалентности булевых схем (LEC) [4, 5]. В основе подхода лежит разбиение исходной задачи SAT на подзадачи с помощью псевдобулевых ограничений.

Рассмотрим функцию $f:\{0,1\}^n \to \{0,1\}^m$, заданную неким алгоритмом, и конъюнктивную нормальную форму (КНФ) C, в которую этот алгоритм преобразован одним из известных способов (см., например, [6]). Пусть $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – множество, образованное переменными, которые, кодируют вход функции f. Пространство всех возможных наборов значений переменных из X, соответственно, может быть представлено числами от 0 до $2^n - 1$.

Для декомпозиции исходной формулы по множеству X методом псевдобулевых интервалов выделяются непересекающиеся интервалы (a, b) такие, что

$$0 \le a < b < 2^n.$$

Каждому такому интервалу ставится в соответствие псевдобулевое ограничение:

$$a \le x_1 + 2 * x_2 + \dots + 2^{n-2} * x_{\{n-1\}} + 2^{n-1} * x_n < b \qquad (1)$$

Данное ограничение преобразуется в дополнительные дизъюнкты одним из известных методов (см., например, [7]) и объединяется с исходной КНФ C, формируя отдельную подзадачу. При правильном выборе интервалов, когда их объединение полностью покрывает весь диапазон $[0, 2^n)$, решение всех полученных подзадач позволяет ответить на вопрос о выполнимости исходной формулы:

- если все подзадачи невыполнимы, то исходная КНФ также невыполнима;
- если хотя бы для одной подзадачи найден выполняющий набор, этот набор является решением исходной задачи.

В работе [8] была предложена базовая эвристика динамического изменения числа интервалов в процессе решения. Алгоритм заключается в следующем: исходная задача декомпозируется на q интервалов, которые помещаются в очередь решения.

* Исследование выполнено в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Теоретические основы, методы и высокопроизводительные алгоритмы непрерывной и дискретной оптимизации для поддержки междисциплинарных научных исследований» поддержке 121041300065-9.

Для каждого интервала запускается SAT-решатель A с ограничением времени работы t, обозначаемый далее через A^t. Если решение не найдено за время t, интервал разбивается на d непересекающихся подинтервалов, которые добавляются в очередь для дальнейшей обработки. Данный процесс естественным образом представляется в виде дерева $T(C)$. Каждый узел дерева соответствует некоторой подзадаче. Уровень узла l определяется рекурсивно: уровень корневой задачи (исходной КНФ C) равен 0; уровень любой другой подзадачи на 1 больше уровня её родителя. Таким образом, уровень указывает на глубину декомпозиции, потребовавшуюся для формирования данной подзадачи.

В настоящей работе предлагаются две новые эвристики, расширяющие базовый алгоритм. Они сохраняют древовидную структуру декомпозиции, оптимизируют процесс её построения и обеспечивают эффективное параллельное решение подзадач. Цель новых эвристик – сокращение времени нахождения выполняющего набора и оптимизация использования вычислительных ресурсов за счёт управления ветвлением дерева и приоритизации подзадач.

Эвристика 1 (Приоритетная обработка по уровням дерева). Подзадачи размещаются в очереди решения в порядке убывания уровня l, что обеспечивает первоочередную обработку интервалов меньшего размера. Такие интервалы (с большим значением l) содержат меньше возможных решений псевдобулевого ограничения (1), что повышает вероятность успешного решения подзадачи SAT-решателем A^t.

Эвристика 2 (Адаптивный выбор числа подинтервалов). Количество новых подзадач $d_{current}$ при разбиении интервала определяется на основе:

- текущего уровня $l_{current}$ в дереве $T(C)$;
- среднего уровня l_{avg} успешно решённых подзадач;
- максимального достигнутого уровня l_{max} .

Правила определения $d_{current}$:

1. Если $l_{current} < l_{avg}$, то $d_{current} = d^{l_{avg} - l_{current}}$ – это ускоряет выход на уровни с высокой вероятностью решения.
2. Иначе, если $l_{current} < l_{max}$, то $d_{current} = d^{l_{max} - l_{current}}$ – это обеспечивает адаптацию к текущей глубине дерева.
3. Иначе $l_{current} = l_{max}$, тогда $d_{current} = d$, а значение l_{max} увеличивается на 1.

На основе предложенных эвристик разработан параллельный алгоритм решения SAT в отношении КНФ с использованием технологии MPI.

В качестве тестовых задач рассматриваются КНФ, кодирующие атаки поиска прообраза для хеш-функции MD4. Конкретно, исследуется атака на неполнораундовую версию функции сжатия MD4. MD4 [9] – один из первых практически реализованных алгоритмов хеширования, основанный на конструкции Меркла-Дамгара [10, 11]. Хотя алгоритм более не считается стойким к атакам на основе поиска коллизий [12], поиск прообраза даже для его функции сжатия остаётся сложной задачей. Наилучшая известная теоретическая атака [13] оценивается в 2^{96} операций и практически нереализуема. Поэтому реалистичные исследования сосредоточены на редуцированных версиях алгоритма. Мы используем обозначение MD4-k для функции сжатия с k раундами (в оригинале 48). Первые успешные атаки были продемонстрированы для MD4-32 [14], затем для $k \leq 39$ [15, 16]. Наибольшее известное значение k, для которого обратимость показана на практике – $k = 43$ [17, 18, 5]. В данной работе мы применяем предложенный алгоритм адаптивной декомпозиции для улучшения результатов, представленных в [5], на этом классе задач.

Каждая из КНФ подавалась на вход параллельному алгоритму, использующему в качестве SAT-решателя Kissat 4.0.1 [19], с различными значениями начального числа интервалов q, верхней границы времени решения одной подзадачи t и параметра d. Вычислительные эксперименты проводились на пяти узлах кластера «Академик В.М. Матросов» ИДСТУ СО РАН [20], каждый из которых оснащен двумя 18-ядерными процессорами Intel Xeon E5-2695 v4 и 128 ГБ оперативной памяти. Результаты вычислительных экспериментов приведены в таблице 1.

Кратко опишем таблицу 1. Столбцы таблицы содержат следующую информацию:

1. В столбце «Задача» приведено имя рассматриваемой КНФ, включающее число раундов k функции сжатия.
2. В столбцах «q», «d», «t» приведены значения одноименных параметров разработанного параллельного алгоритма. Значения параметров установлены в соответствии с [5] для обеспечения сравнимости результатов.

Таблица 1 – Результаты полного решения декомпозиций, построенных по методу псевдобулевых интервалов с различными входными параметрами параллельного алгоритма, использующего эвристики 1 и 2. Время указано в секундах.

Задача	q	d	t	Число прерванных задач	l_{max}	Время CPU	Время wall-clock	Время wall-clock для CnC
MD4-40	60000	2	220	3089	4	6763298	43 054	—
MD4-41	60000	2	220	7455	4	9128960	57 660	>300 000
MD4-42	60000	2	220	1904	4	5858125	37 498	>300 000
MD4-43	60000	2	220	4020	3	7027119	43 288	264 039

3. В столбце «Число прерванных задач» указано число прерванных из-за превышения «t» запусков алгоритма A^t.
4. В столбце «l_{max}» приведена максимальная глубина дерева $T(C)$, достигнутая в процессе решения задачи.
5. В столбце «Время CPU» указано время решения задачи в пересчете на 1 ядро вычислительной платформы.
6. В столбце «Время wall-clock» указано реальное время решения задачи на 5 узлах (180 ядрах) вычислительной платформы.
7. В столбце «Время wall-clock для CnC» показаны результаты использования стратегии «Cube-and-Conquer» (CnC) с настройками по умолчанию. Кубы для CnC генерировались при помощи march_cu* и обрабатывались при помощи решателя Kissat 4.0.1. Для MD4-40 march_cu не смог построить кубы за 100000 секунд. Для MD4-41 и MD4-42 время решения превысило 300000 секунд, без нахождения выполняющего набора. Для MD4-43 решателю потребовалось 264 039 секунд, чтобы найти выполняющий набор.

Отметим, что разработанный алгоритм, в отличие от CnC, продолжал обработку интервалов из очереди решения даже после нахождения выполняющего набора, останавливаясь только после опустошения очереди решения и завершения всех подзадач. Это обеспечило корректное сравнение с результатами из [5].

* https://github.com/marijnheule/CnC

По результатам экспериментов можно сделать вывод о превосходстве разработанного алгоритма над приведенным в [5] и стандартным алгоритмом «Cube-and-Conquer» при решении задач обращения функций сжатия MD4-40 – MD4-43. Стоить заметить, что алгоритм обладает значительным потенциалом для дальнейшего улучшения. Среди перспективных направлений можно выделить разработку эвристик для автоматического выбора и динамической адаптации параметров q, d и t, что может существенно повысить производительность. Кроме того, перспективной оптимизацией представляется обмен изученными дизъюнктами между различными ветвями дерева декомпозиции $T(C)$. Исследование этих направлений, а также эффективности метода на других классах криптографических задач, планируется в рамках будущей работы.

1. Marques-Silva J., Lynce I., Malik S. Conflict-driven clause learning SAT solvers // Handbook of Satisfiability. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. 2009. Vol. 185. P. 131–153.
2. Bard G. Algebraic Cryptanalysis. Springer, 2009.
3. Heule M.J.H., Kullmann O., Wieringa S., Biere A. Cube and conquer: Guiding cdcl sat solvers by lookaheads // HVC. 2012. P. 50–65.
4. Semenov A., Chukharev K., Tarasov E., Chivilikhin D., Kondratiev V. Estimating the hardness of SAT encodings for Logical Equivalence Checking of Boolean circuits. arXiv:2210.01484 [cs.AI].
5. Chukharev K., Gribanova I., Ivanov D., Kochemazov S., Kondratiev V., Semenov A. Effective Partitioning Method with Predictable Hardness for CircuitSAT // IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 4218–4234.
6. Semenov A.A., Otpuschennikov I.V., Gribanova I., Zaikin O., Kochemazov S. Translation of algorithmic descriptions of discrete functions to SAT with applications to cryptanalysis problems // Logical Methods in Computer Science. 2020. Vol. 16, No. 1.
7. Eén N., Sörensson N. Translating pseudo-boolean constraints into SAT // Journal on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation. 2006. Vol. 2, No. 1-4. P. 1–26.
8. Кондратьев В.С. Динамический подбор ограничений, ослабляющих трудные примеры задачи проверки эквивалентности булевых схем // Ляпуновские чтения - 2024: Материалы 40-й международной конференции, Иркутск, 02–06 декабря 2024 года. – Иркутск: Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, 2024. – С. 107-110.
9. Rivest R.L. The MD4 message digest algorithm // Advances in Cryptology - CRYPTO. 1990. P. 303–311.
10. Merkle R.C. A certified digital signature // CRYPTO. Lecture Notes in Computer Science. 1989. Vol. 435. P. 218–238.
11. Damgard I. A design principle for hash functions // Advances in Cryptology - CRYPTO. LNCS. 1989. Vol. 435. P. 416–427.
12. Wang X., Lai X., Feng D., Chen H., Yu X. Cryptanalysis of the hash functions MD4 and RIPEMD // EUROCRYPT. LNCS. 2005. Vol. 3494. P. 1–18.
13. Leurent G. MD4 is not one-way // FSE. LNCS. 2008. Vol. 5086. P. 412–428.
14. Dobbertin H. The first two rounds of MD4 are not one-way // FSE. LNCS. 1998. Vol. 1372. P. 284–292.
15. De D., Kumarasubramanian A., Venkatesan R. Inversion attacks on secure hash functions using satsolvers // SAT. LNCS. 2007. Vol. 4501. P. 377–382.
16. Gribanova I., Semenov A.A. Using automatic generation of relaxation constraints to improve the preimage attack on 39-step MD4 // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2018. P. 1174–1179.
17. Zaikin O. Inverting 43-step MD4 via Cube-and-Conquer // IJCAI. 2022. P. 1894–1900.
18. Zaikin O. Inverting cryptographic hash functions via Cube-and-Conquer // J. Artif. Intell. Res. 2024. Vol. 81. P. 359–399.
19. Biere A., Fazekas K., Fleury M., Heisinger M. CaDiCaL, Kissat, Paracooba, Plingeling and Treengeling entering the SAT Competition 2020 // Proc. of SAT Competition 2020 – Solver and

Benchmark Descriptions. Department of Computer Science Report Series B. 2020. Vol. B-2020-1. P. 51–53.
20. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс]: сайт. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН. – URL: http://hpc.icc.ru (дата обращения 15.10.2025).

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

В. Б. Кондусова[1], Г. С. Батраков[2]
Оренбургский государственный университет, ООО «Оренбургский радиатор»
valyosha@list.ru, batrak012@mail.ru

Назначение программы заключается в автоматизации процесса проектирования технологической оснастки, такой как люнеты, тиски и патроны трехкулачковые, с возможностью выбора конфигурации, задания параметров и проверки прочностных характеристик [1].

Разработка направлена на упрощение и ускорение работы инженера-конструктора за счёт снижения рутинных операций и минимизации вероятности ошибок при расчётах. Программа позволяет пользователю в интерактивном режиме выбрать необходимый тип оснастки, задать её геометрические параметры и получить предварительную 3D-модель с последующей оценкой прочности ключевых элементов.

Встроенные инженерные алгоритмы обеспечивают расчёт жёсткостных характеристик по заданным габаритам и материалам, что даёт возможность оперативно оценить пригодность конструкции ещё до стадии физического моделирования. Это особенно важно при серийном или массовом производстве, где стабильность и надёжность оснастки напрямую влияют на точность и качество обработки деталей.

Кроме того, программа интегрируется с САПР Компас-3D, что даёт возможность использовать построенные модели в дальнейшем при создании сборочных чертежей и технологических карт. Таким образом, система играет роль связующего звена между конструкторским и технологическим этапами проектирования.

При инициализации программы на экране отображается главное меню, представленное на рисунке 1.

Интерфейс содержит интуитивно понятные элементы управления, с помощью которых пользователь может выбрать необходимый тип технологической оснастки. В текущей версии предусмотрены три варианта: люнет, патрон трёхкулачковый и тиски.

Выбор конкретного вида оснастки позволяет перейти к следующему этапу — вводу параметров конструкции, последующим расчётам и визуализации модели. Такое разграничение обеспечивает гибкость системы и адаптацию под различные производственные задачи.

При выборе варианта «Люнет», интерфейс программы переходит в соответствующее окно, представленное на рисунке 2.

На данном этапе пользователю предлагается ввести необходимые параметры конструкции люнета, такие как внутренний диаметр, высота стойки, толщина основания и другие геометрические и прочностные характеристики.

После ввода всех данных осуществляется проверка правильности введённых значений. Система автоматически определяет, соответствуют ли параметры допустимым диапазонам и инженерным требованиям. В случае обнаружения некорректных или недопустимых значений, пользователю выводится уведомление с предложением откорректировать данные.

Только после успешного прохождения этапа валидации программа переходит к расчёту жёсткости и построению модели.

Аналогичная логика взаимодействия реализована и для других видов оснастки. Так, при выборе тисков открывается соответствующее окно, представленное на рисунке 3. Пользователю необходимо ввести параметры, характеризующие тиски: размеры тисков. После ввода данных система выполняет их проверку на корректность и соответствие допустимым инженерным значениям.

Ввод параметров для патрона трёхкулачкового отображён на рисунке 4. В данном случае пользователь задаёт значения, такие как диметр пальца. По аналогии с другими модулями системы, введённые данные проходят верификацию, после чего становится доступна функция расчёта и последующего моделирования.

Если введённые пользователем параметры не удовлетворяют требованиям прочностного расчёта, программа автоматически уведомляет об ошибке (рисунок 5).

Система анализирует полученные результаты и в случае недостаточной жёсткости конструктивных элементов выводит сообщение с предупреждением. Пользователю предлагается изменить один или несколько параметров, например, увеличить толщину, изменить высоту опоры или выбрать другой материал.

Такой механизм обратной связи обеспечивает надёжность проектируемой оснастки и исключает возможность перехода к следующему этапу (моделированию и сохранению) без прохождения прочностной проверки.

Если все введённые пользователем параметры соответствуют установленным требованиям и находятся в пределах допустимых значений, система выводит соответствующее уведомление.

На экране появляется информационное сообщение, представленное на рисунке 6, подтверждающее, что данные корректны, и все расчёты выполнены без ошибок.

Данное уведомление свидетельствует о готовности модели к дальнейшему этапу – построению геометрической формы оснастки, её визуализации и сохранению проекта.

Таким образом, система не только обеспечивает контроль достоверности исходных данных, но и способствует уверенности пользователя в правильности выполненного проектирования.

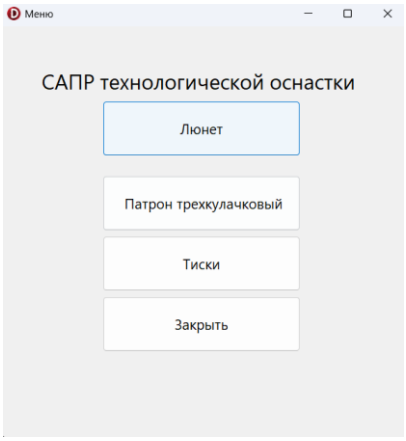


Рисунок 1. Меню

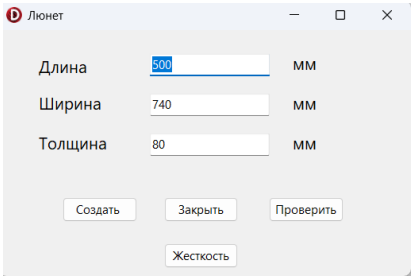


Рисунок 2.Интерфейс Люнет

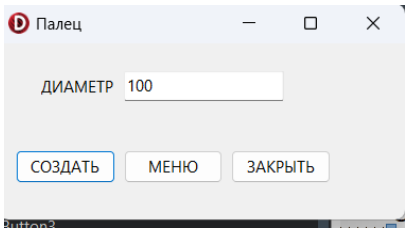


Рисунок 3. Интерфейс патрон

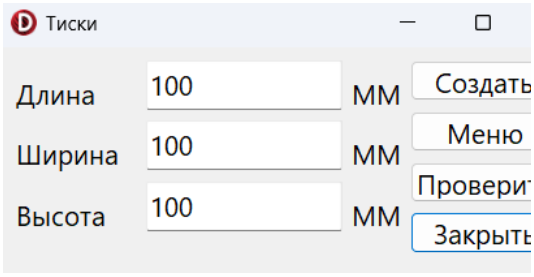


Рисунок 4. Интерфейс Тиски

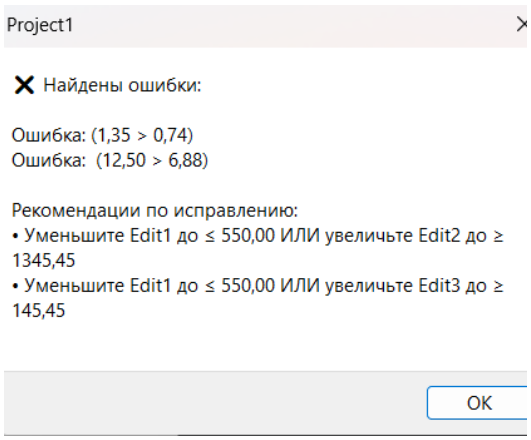


Рисунок 5. Окно «Выявление ошибки»

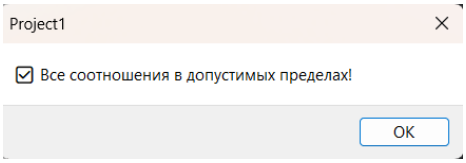


Рисунок 6. Окно «Вывод правильности данных»

После успешного ввода параметров, прохождения всех проверок и расчётов пользователь получает доступ к этапу моделирования.

На этом этапе возможно автоматическое построение 3D-моделей технологической оснастки, соответствующей введённым значениям. Примеры сгенерированных моделей представлены на рисунках 7, 8 и 9, где отображены конструкции люнета, тисков и пальца трёхкулачкового патрона соответственно.

Каждая из моделей формируется с учётом всех геометрических параметров и технических требований, заданных ранее, что позволяет использовать их в дальнейших процессах визуализации, анализа, а также в подготовке к производству.

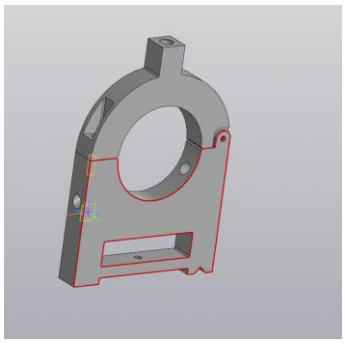


Рисунок 7. Модель Люнет

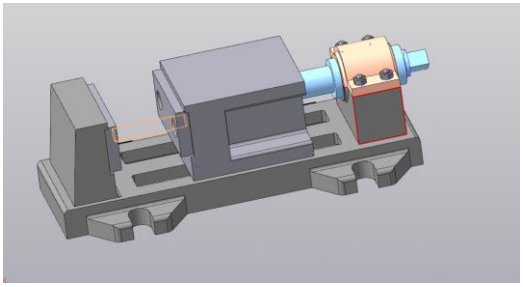


Рисунок 8. Модель тисков

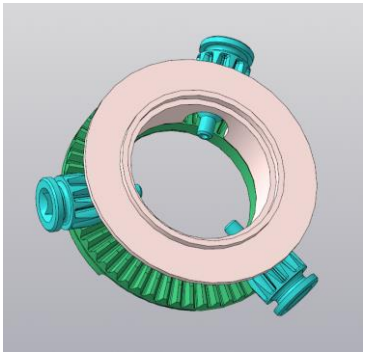


Рисунок 9.Модель пальца трехкулачкового

1. Батраков Г.С., Кондусова В.Б. Разработка и внедрение системы автоматизированного проектирования технологической оснастки на предприятии // Международный научный журнал «Вестник науки». 2025. Том 3, № 6 (87). С. 1659-1663. https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-vnedrenie-sistemy-avtomatizirovannogo-proektirovaniya-tehnologicheskoy-osnastki-na-predpriyatii/viewer

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ВЕБ-КОНСТРУКТОРА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ИГР С ПОДДЕРЖКОЙ ПЛАГИНОВ И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ СЦЕНАРИЕВ

Е. С. Конова
Иркутский государственный университет
konova.ek@mail.ru

Современные образовательные технологии активно используют игровые методы для повышения мотивации и улучшения усвоения материала. Однако создание качественных образовательных игр требует значительных временных затрат и специальных знаний. Мы разработали веб-конструктор, позволяющий преподавателям без навыков программирования создавать интерактивные обучающие игры на основе готовых шаблонов.

Для реализации конструктора была разработана модульная архитектура с использованием современных веб-технологий. Фронтенд-часть системы построена на библиотеке React, что обеспечивает отзывчивый и интуитивно понятный интерфейс. React был выбран благодаря компонентному подходу, который идеально согласуется с модульной философией всего проекта. Каждый элемент интерфейса, будь то конструктор игр, визуальный редактор или сам плеер игры, реализован как независимый и переиспользуемый компонент. Серверная часть реализована на Python с использованием фреймворка FastAPI, что позволяет эффективно работать с бизнес-логикой и обеспечивает масштабируемость решения.

Ключевой особенностью системы является поддержка подключаемых модулей (плагинов), реализующих различные игровые механики: «Викторина», «Карточки», «Лабиринт», «Пазл» и другие. Плагины разрабатываются как изолированные компоненты с собственной логикой и интерфейсом, что позволяет расширять функциональность конструктора без изменения основного кода.

Для настройки игровых сценариев предусмотрен визуальный редактор с Drag-and-Drop интерфейсом. Преподаватели могут определять последовательность заданий, настраивать систему начисления очков, устанавливать правила завершения игры, создавая таким образом уникальные образовательные траектории без написания кода.

Помимо конструктора, система включает в себя комплекс подсистем: аутентификацию и авторизацию, личные библиотеки игр, общедоступный каталог для обмена готовыми решениями, рейтинговую систему для организации соревнований между учениками, а также механизмы монетизации через премиум-шаблоны и авторские вознаграждения. Таким образом, разработанная модульная архитектура на базе React и FastAPI с поддержкой плагинов и визуального редактора сценариев создает целостную, технологически современную экосистему, которая существенно упрощает процесс создания образовательных игр и способствует их широкому внедрению в учебный процесс школ и вузов.

Разработанное решение позволяет существенно упростить процесс создания образовательных игр и способствует широкому внедрению игровых методов в учебный процесс школ и вузов.

1. Building a Plugin System with React. Доступно по ссылке: https://react.dev/learn/scaling-up-with-reducer-and-context (дата обращения: 12 октября 2025).
2. Архитектура модульных React + Redux приложений. Доступно по ссылке: https://habr.com/ru/articles/326484/ (дата обращения: 12 октября 2025).
3. Проектирование архитектуры ПО React: лучшие практики. Доступно по ссылке: https://dzen.ru/a/ZATuUE3ZOSWQGxqR (дата обращения: 12 октября 2025).
4. Разработка браузерных игр с использованием Phaser3, React, Typescript. Доступно по ссылке: https://vc.ru/dev/896014-razrabotka-brauzernyh-igr-s-ispolzovaniem-phaser3-react-typescript (дата обращения: 12 октября 2025).

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ГИРОСТАТА ГОРЯЧЕВА-СРЕТЕНСКОГО С НЕЛИНЕЙНЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ В ОСОБОМ СЛУЧАЕ

А. А. Косов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
kosov_idstu@mail.ru

Рассмотрим гиростат Горячева-Сретенского [1, 2] в случае нелинейного потенциала $U = U(\gamma_1)$, где $U(\gamma_1)$ - некоторая дважды непрерывно дифференцируемая функция. Уравнения движения и первые интегралы записываются так

$$4C\dot{p} = 3Cqr - \lambda_3 q$$
$$4C\dot{q} = -3Cpr + \lambda_3 p + U'(\gamma_1)\gamma_3 \quad (1)$$
$$C\dot{r} = -U'(\gamma_1)\gamma_2$$

$$\dot{\gamma}_1 = r\gamma_2 - q\gamma_3,\ \dot{\gamma}_2 = p\gamma_3 - r\gamma_1,\ \dot{\gamma}_3 = q\gamma_1 - p\gamma_2. \quad (2)$$
$$J_1 = 4Cp^2 + 4Cq^2 + Cr^2 + 2U(\gamma_1) = c_1 = const \quad (3)$$
$$J_2 = 4Cp\gamma_1 + 4Cq\gamma_2 + \gamma_3(Cr + \lambda_3) = c_2 = const \quad (4)$$
$$J_3 = \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1. \quad (5)$$

Утверждение 1. *Вдоль любого решения системы* (1), (2) *зависящая от всех фазовых переменных функция* $\Psi(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\omega}) = -qU'(\gamma_1)J_2 - 4CU''(\gamma_1)p\gamma_3(r\gamma_2 - q\gamma_3)$ *совершает колебания с нулевым средним значением.*

Для функции $J_5 = 4C(Cr - \lambda_3)(p^2 + q^2) - 4CU'(\gamma_1)p\gamma_3$ производная в силу системы (1), (2) равна $\Psi(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\omega})$. Таким образом, можно сказать, что функция J_5 является интегралом лишь «в среднем», поскольку ее производная в силу системы вдоль всех движений совершает колебания с нулевым средним значением.

Рассмотрим уравнение $U'(z) = 0$ и будем далее предполагать, что оно имеет нулевой корень $z = 0$. В этом особом случае, выделяемым равенством $U'(0) = 0$, у системы (1), (2) имеется два семейства перманентных вращений

$$\bar{p} = \bar{q} = 0,\ \bar{r} = \omega,\ \bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = 0,,\ \bar{\gamma}_3 = \sigma = \pm 1 \quad (6)$$

где $\omega \in R, \omega \neq 0$ – величина угловой скорости. Когда угловая скорость равна нулю, (6) приводит к двум состояниям покоя

$$\bar{p} = \bar{q} = \bar{r} = 0,\ \bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = 0,,\ \bar{\gamma}_3 = \sigma = \pm 1 \quad (7)$$

Отметим, что в случае классического гиростата Горячева-Сретенского [1, 2] стационарных решений (6), (7) у уравнений (1), (2) нет.

Перейдем теперь к анализу устойчивости стационарных решений (6), (7).

Утверждение 2. *Перманентное вращение из однопараметрического семейства* (6) *устойчиво по Ляпунову, если для него выполняются условия*

$$\lambda_3\omega - 3C\omega^2 > 0,\ U''(0) + \lambda_3\omega - 3C\omega^2 > 0 \quad (8)$$

Утверждение 3. *Каждое перманентное вращение из семейства* (6)*, для которого вычисляемые по формулам*

$$a_0 = \frac{1}{16C^2}(\lambda_3\omega - 3C\omega^2)(U''(0) + \lambda_3\omega - 3C\omega^2)$$
$$a_2 = \frac{1}{16C^2}\left((5C\omega - \lambda_3)^2 + 4C(U''(0) + \lambda_3\omega)\right)$$

коэффициенты характеристического уравнения удовлетворяют хотя бы одному из трех неравенств $a_0 < 0, a_2 < 0, a_2^2 - 4a_0 < 0$*, неустойчиво по Ляпунову.*

В частности, если в достаточных условиях устойчивости (8) одно из выражений сменит знак на противоположный, а другое сохранит знак, то это повлечет неустойчивость из-за $a_0 < 0$.

Утверждение 4. Если $U''(0) > 0$*, то оба состояния покоя* (7) *устойчивы по Ляпунову. Если же* $4CU''(0) + \lambda_3^2 < 0$*, то оба состояния покоя* (7) *неустойчивы по Ляпунову.*

Анализ устойчивости других стационарных решений уравнений движения гиростата Горячева-Сретенского с нелинейным потенциалом был представлен ранее в [3]. Изложенные здесь результаты в [3] не рассматривались.

1. Горячев Д.Н. О движении тяжелого твердого тела вокруг неподвижной точки в случае *A*=*B*=4*C* // Матем. сб. 1900. Т. 21. Вып.:3. С. 431–438.
2. Сретенский Л.Н. О некоторых случаях интегрируемости уравнений движения гиростата // Докл. АН СССР. 1963. Т. 149. № 2. С. 292–294.
3. Косов А.А. Об устойчивости стационарных решений уравнений движения гиростата Горячева–Сретенского с нелинейным потенциалом // Материалы конференции "Ляпуновские чтения" (Иркутск, 5-9 декабря 2022 г.). 2022. С. 73-74.

ПОСТРОЕНИЕ ТОЧНЫХ МНОГОМЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ И СИСТЕМ С ОПЕРАТОРОМ МОНЖА-АМПЕРА

А. А. Косов, Э. И. Семенов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
kosov_idstu@mail.ru, edwseiz@gmail.com

В докладе представлены результаты, опубликованные в цикле статей [1-5]. Общее свойство всех объектов исследования – описание нелинейными дифференциальными уравнениями, включающими оператор Монжа-Ампера. Оператор Монжа-Ампера представляет собой определитель матрицы Гессе, составленный из частных производных второго порядка. Уравнения с оператором Монжа-Ампера используются в дифференциальной геометрии, газовой динамике, геофизике, теории упругости, квантовой теории поля, физике плазмы, задачах оптимальной транспортировки, гидродинамике двухжидкостных сред и других приложениях. Поэтому построение точных решений уравнений и систем такого рода представляет интерес для широкого круга прикладных задач.

Изучалось [1, 2] многомерное обобщенное уравнение Монжа-Ампера, для которого предложена конструкция многомерных точных решений, выражаемых через суперпозицию квадратичной формы от пространственных переменных и решений нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения, порождаемого исходным уравнением.

Рассматриваются [3] эволюционные многомерные обобщенные уравнения Монжа-Ампера, правые части которых помимо определителя матрицы Гессе могут зависеть от оператора Лапласа и градиента искомой функции. Предложен вариант метода редукции для построения точных многомерных решений обобщенных эволюционных уравнений Монжа-Ампера с использованием разделения переменных. Получены многомерные точные решения, выражаемые явным образом через элементарные функции и через решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Приводится целый ряд примеров точных решений, как радиально симметричных, так и анизотропных по пространственным переменным, выражающихся через комбинации элементарных функций.

Рассматривались [4] системы двух уравнений с оператором Монжа-Ампера, правые части которых могут зависеть от оператора Лапласа и градиента искомых функций. Для построения точных многомерных решений в случае, когда правые части содержат степенные или экспоненциальные функции неизвестных, предложен вариант метода редукции к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Получены многомерные точные решения, выражаемые явным образом через суперпозицию квадратичных форм от пространственных переменных и элементарных функций.

Точные решения построены [5] также для гиперболических уравнений с оператором Монжа-Ампера.

1. Косов А.А., Семенов Э.И. О точных решениях многомерного обобщенного уравнения Монжа–Ампера // Дифференциальные уравнения. 2024. Т.60. № 10. С. 1334-1349.
2. Косов А.А., Семенов Э.И. Обобщенное уравнение типа Монжа–Ампера и его многомерные точные решения // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2025. Т. 35. № 2. С. 215-230.
3. Косов А.А., Семенов Э.И. О многомерных точных решениях обобщенных эволюционных уравнений Монжа–Ампера // Дифференциальные уравнения. 2025. Т.61. № 6. С. 748-762.

4. Косов А.А., Семенов Э.И. Система уравнений с оператором Монжа —Ампера и ее многомерные точные решения // Сибирский математический журнал. 2025. Т. 66. № 4. С. 669–682.
5. Косов А.А., Семенов Э.И. О многомерных точных решениях гиперболического уравнения с оператором Монжа–Ампера // Дифференциальные уравнения. 2025. Т.61. № 12.

КОНЦЕПЦИЯ ПОДХОДА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ*

Д. Е. Косогоров
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
dmitriy.kosogorov@yandex.ru

Большие Языковые Модели (далее – БЯМ) достигли значительных успехов за последние годы из-за их способности обрабатывать текстовые запросы и работать с задачами обработки естественного языка [1]. БЯМ стали основой в ряде приложений и инструментов, с их помощью решается широкий спектр практических задач в различных предметных областях. Однако у БЯМ встречается ряд проблем, а именно: (1) *галлюцинации* (создание фактически неточных выходных данных); (2) *нехватка контекстных данных* внутри модели (БЯМ показали способность сохранять в весах данные и отвечать на их основе, однако, если какие-то сведения отсутствовали в обучающем наборе данных, то они не смогут их воспроизвести); (3) *необходимость обновления данных*, с которыми работает модель (например, в рекомендательных системах нужно довольно часто добавлять в базу данных сведения о новых рекомендациях). Одним из вариантов решения этих проблем является дообучение БЯМ под конкретную практическую задачу на специфических данных. Однако такое решение является очень сложным, ресурсно-затратным и негибким.

Другим перспективным решением этих проблем является – генерация, дополненная поиском (Retrieval Augumented Generation – RAG) [2]. Данный подход подразумевает предварительный поиск релевантных документов в подготовленной базе данных, чтобы на их основе дать БЯМ (генератору) дополнительную информацию и контекст. Из-за наличия релевантных данных уменьшается риск галлюцинаций, генератор имеет необходимые контекстные данные, а для обновления релевантных данных не требуется каждый раз дообучать модель. На сегодняшний день предложен ряд подходов к организации RAG, использующие, как методы предварительного извлечения информации (Query Expansion, Query rewriting, Query Routing), постобработки данных (Retrieval Reranking, Retrieval summary, Retrieval Fusion) и модульной структуры (RAG Modules), так и расширенного представления контекста в виде связанных деревьев чанков или графов знаний [3, 4]. Однако, несмотря на проделанные успехи, данные технологии RAG еще далеки от повсеместного применения в различных практических слабо-формализованных задачах. В первую очередь это связано с балансом между скоростью и качеством извлечений, который необходимо устанавливать для каждой новой задачи. При этом организация и обновление хранилища данных, как правило, направлено только на текстовые документы, исключая другие распространенные форматы, такие как таблицы или код.

Таким образом, в данной работе предлагается новая концепция алгоритмического и методологического обеспечения для повышения эффективности работы БЯМ на основе организации RAG-системы с использованием сегментации документов и графов знаний, в том числе для работы с документами без чёткой структуры и содержащая табличную информацию. Такой метод позволяет упрощать

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9).

многосвязные и многоходовые рассуждения БЯМ, используя пути в графе и определенные сегменты документов в качестве дополнительного контекста. Также это обеспечивает сохранение смысловых связей между отдельными чанками (частями документов).

1. Chang Y., Wang X., Wang J., Wu Y., Yang L., Zhu K., Chen H., Yi X., Wang C., Wang Y., Ye W., Zhang Y., Chang Y., Yu P.S., Yang Q., Xie X. A Survey on Evaluation of Large Language Models // ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, Vol. 15, No. 3, 2024, P. 1-45. DOI: 10.1145/3641289.
2. Fan W., Ding Y., Ning L., Wang S., Li H., Yin D., Chua T.-S., Li Q. A Survey on RAG Meeting LLMs: Towards Retrieval-Augmented Large Language Models // KDD'24: Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2024, P. 6491-6501. DOI: 10.1145/3637528.3671470.
3. Li S., Stenzel L., Eickhoff C., Bahrainian S.A. Enhancing Retrieval-Augmented Generation: A Study of Best Practices // Proceedings of the 31st International Conference on Computational Linguistics (COLING'25), 2025, P. 6705-6717.
4. Li Z., Wang Z., Wang W., Hung K., Xie H., Wang F.L. Retrieval-augmented generation for educational application: A systematic survey // Computers and Education: Artificial Intelligence, Vol. 8, 2025, 100417. DOI: 10.1016/j.caeai.2025.100417.

О ВЫБОРЕ НАЧАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ МЕТОДА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ В ЭПИДЕМИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ*

Н. О. Косьянов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
kosyanov.nik@gmail.com

Рассмотрим задачу распределения m пациентов между n лечебными учреждениями таким образом, чтобы максимальное время нагруженности среди всех учреждений было наименьшим, то есть

$$(\mathcal{TP}_m): \qquad f_m(x) = \max\left\{\frac{x_1}{\pi_1}; \frac{x_2}{\pi_2}; \dots; \frac{x_n}{\pi_n}\right\} \downarrow \min_{x \in X_m}, \quad X_m \subset \mathbb{Z}_0^n \tag{1}$$

$$X_m: \sum_{i=1}^{n} x_i = m, \quad 0 \le x_i \le c_i, \quad i = \overline{1,n}. \tag{2}$$

Здесь x_i – количество пациентов, направленных на лечение в медицинское учреждение i, $\pi_i \in \mathbb{N}$ определяет производительность (мощность) учреждения i и напрямую зависит от численности медицинского персонала, X_m – допустимое множество задачи (множество всех возможных распределений пациентов), c_i – вместимость медицинского учреждения (максимальное число пациентов, которое учреждение i может принять), которая обычно зависит от количества палат и запаса лекарств в учреждении.

Для решения задачи (1)–(2) был разработан оригинальный метод, который будем называть Методом потенциальных значений (МПЗ).

Шаг 0. Положить $k := 0$, $x^k := 0$, $p(x^k) := \left({}^1/_{\pi_1}; {}^1/_{\pi_2}; \dots; {}^1/_{\pi_m}\right)$.

Шаг 1. Если $k < m$, тогда найти $j = \operatorname{argmin}_{i \in \{1,2,\dots,n\}}\{p_i\}$, где $x_j + 1 \le c_j$. Иначе STOP.

Шаг 2. Положить

$$x^{k+1} := \begin{cases} x_i^{k+1} = x_i^k, & \forall i \ne j, \\ x_j^{k+1} = x_j^k + 1, \end{cases} \quad p(x^{k+1}) := \begin{cases} p_i^{k+1} = p_i^k, & \forall i \ne j, \\ p_j^{k+1} = p_j^k + \dfrac{1}{a_j}; \end{cases} \tag{3}$$

$k := k + 1$ и вернуться на Шаг 1.

В работе [1] было показано, что можно добиться существенного ускорения работы метода при выборе особых начальных приближений для x^k. Например, если

$$x^k := \begin{cases} x_i^{k+1} = q\pi_i, & \text{если } q\pi_i < c_i, \\ x_j^{k+1} = c_i, & \text{если } q\pi_i \ge c_i, \end{cases}, \quad k = \sum_{i=1}^{n} x_i^k, \quad q = \left\lfloor \frac{N}{\sum_{i=1}^{n} \pi_i} \right\rfloor; \tag{4}$$

то такое приближение удовлетворяет основной теореме метода потенциальных значений и гарантированно приводит к решению задачи $(\mathcal{TP}_m)$.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 24-41-03004.

Будем называть такой способ выбора начального приближения гарантированным.

Предложение. Если в качестве начального приближения выбрать

$$x^k := \begin{cases} x_i^{k+1} = \lfloor \tilde{q}\pi_i \rfloor, & \text{если } \lfloor \tilde{q}\pi_i \rfloor < c_i, \\ x_j^{k+1} = c_i, & \text{если } \lfloor \tilde{q}\pi_i \rfloor \geq c_i, \end{cases}, \quad k = \sum_{i=1}^{n} x_i^k, \quad \tilde{q} = \frac{N}{\sum_{i=1}^{n} \pi_i} - \max_{i \in \{1,2,\dots,n\}} \{1/\pi_i\}, \quad (5)$$

то несмотря на то, что приближение не удовлетворяет основной теореме метода потенциальных значений, оно всё равно приводит к решению задачи $(\mathcal{TP}_m)$, а сам поиск решения происходит быстрее.

Данный способ выбора начального приближения будем называть экспериментальным.

В таблице 1 представлены результаты сравнения метода потенциальных значений при старте из различных начальных приближений на массиве 1000 тестовых задач, моделирующих большую эпидемическую нагрузку для страны в период пандемии. Параметры для тестовых задач были выбраны случайно из заранее заданных диапазонов (см. таблицу 2).

Таблица 1 – Результаты численного тестирования

Начальное приближение	Среднее число шагов МПЗ	Среднее время поиска решения (сек.)	Отличие в решениях (хотя бы в одной задаче)
Отсутствует	> 1 000 000	> 10.0000	False
Гарантированное	36 695.90	0.1314	False
Экспериментальное	337.38	0.0013	False

Таблица 2 – Параметры численного тестирования

Параметр	Диапазон значений
m	[1 500 000, 20 000 000]
n	[3, 20]
π_i	$[20;\ 25\ 000]$
c_i	$[10\ 000;\ 3\ 000\ 000]$

Как можно заметить, экспериментальный способ выбора начального приближения, в среднем, сокращает количество итераций метода потенциальных значений в 100 раз и во столько же раз ускоряет время поиска решения. Полученные результаты являются стимулом для обобщения основной теоремы метода потенциальных значений. Разработанные модификации метода в дальнейшем могут быть применены к задачам распределения из других областей [2], например к задаче распределения нагрузки между ресурсами вычислительного центра [3].

1. Kosyanov N.O. On an Improvement to the Next-step Procedure. Proc. of the 7th International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2025), Irkutsk, Russia, 2025, pp. 149–151.

2. Ko S.Y., Chen H.L., Cheng S.W. et al. Polynomial-Time Combinatorial Algorithm for General Max-Min Fair Allocation. Algorithmica, vol. 86, 2024, pp. 485–504. doi: doi.org/10.1007/s00453-023-01105-3.

3. Feoktistov, M. Voskoboinikov, A. Tchernykh, Framework for Development and Execution of Scientific WorkFlows: Designing Service-Oriented Applications, Programming and Computer Software, 2024, vol. 50, no. 8, pp. 900–913. doi: doi.org/10.1134/S0361768824700828.

О ГРАНИЧНОЙ ЗАДАЧЕ С ВЫРОЖДЕНИЕМ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ОДНОЙ МОДЕЛИ ХЕМОТАКСИСА

П. А. Кузнецов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
kuznetsov@icc.ru

В математических моделях бактериального хемотаксиса [1] используются системы вида

$$u_t = u_{xx} + F(u,v), \;\; v_t = [D(u,v,u_x,v_x)]_x + G(v,u). \qquad (1)$$

Согласно модели, популяцию бактерий плотности $v(t,x)$ помещают в среду, содержащую питательное вещество (хемоаттрактант) концентрации $u(t,x)$. Бактерии меняют свое распределение, диффундируя с хемоаттрактантом. Система (1) описывает механизмы такой диффузии [2], причем за характер диффузии (обычная или перекрестная) отвечает достаточно гладкая функция D. Функции D, F, G предполагаются известными и могут устанавливаться экспериментально.

Бактериальные популяции при хемотаксисе зачастую образуют весьма интересные пространственные структуры: концентрические окружности, спиральные волны, ветви (см. [2], гл. 5). Все они имеют подвижную границу ареала обитания, инициируя, таким образом, биологическую волну (см. [3], гл. 11). Предполагая, что фронт волны v описывает достаточно гладкая кривая $x = a(t)$, а константа $c > 0$ есть изначальная концентрация хемоаттрактанта u, которая неизменна от фронта и далее, естественно рассматривать систему (1) вкупе с граничными условиями

$$v(t,x)|_{x=a(t)} = 0, \;\; u(t,x)|_{x=a(t)} = c > 0. \qquad (2)$$

В докладе система (1) рассмотрена в одном частном случае, при котором

$$D = vD_0(u,u_x,v_x), \quad D_0 \in C^1(R^3). \qquad (3)$$

Тогда задача (1), (2), (3) относится к классу вырождающихся, так как на фронте группа старших производных второго уравнения системы (1) обращается в нуль. Для решения таких параболических задач с вырождением целесообразно использовать метод степенных характеристических рядов, разработанный в научной школе акад. А.Ф. Сидорова [4] и хорошо зарекомендовавший себя при решении систем типа «реакция-диффузия» [5] и «хищник-жертва» [6]. На основе указанного метода в докладе представлен аналитический алгоритм построения решения задачи (1), (2), (3), доказана его сходимость. Отдельно получены некоторые иллюстративные точные решения типа бегущих волн, дана их интерпретация в рамках модели.

1. Ризниченко Г.Ю. Лекции по математическим моделям в биологии. М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2011 г.
2. Murray J.D. Mathematical Biology II: Spatial Models and Biomedical Applications. Interdisciplinary Applied Mathematics. Vol. 18. New York: Springer, 2003.
3. Murray J.D. Mathematical Biology I: An Introduction. Interdisciplinary Applied Mathematics. Vol. 17. New York: Springer, 2002.
4. Сидоров А.Ф. Избранные труды: Математика. Механика. М.: Физматлит, 2001.
5. Kazakov A.L., Kuznetsov P.A., Lempert A.A. Analytical Solutions to the Singular Problem for a System of Nonlinear Parabolic Equations of the Reaction-Diffusion Type // Symmetry. 2020. Vol. 12, iss. 6. pp. 999.
6. Кузнецов П.А. Аналитические диффузионные волны в нелинейной параболической модели «хищник-жертва» // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2022. Т. 28, № 2. С. 158-167.

НАЗЕМНЫЙ И СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЗАГОРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ*

Р. А. Кузьминых[1, 2], В. Ф. Рапута[1], Т. В. Ярославцева[1-3], Е. Е. Сивцев[2]
[1]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
[2]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН,
[3]Новосибирский НИИ гигиены Роспотребнадзора
ruslana215w@mail.ru

Заметное влияние атмосферных выбросов примесей с территорий крупных городов может простираться на многие десятки километров за их пределами. Особенно интенсивно процессы загрязнения загородных территорий протекают в зимний период времени [1, 2]. Этому способствует как дополнительное увеличение эмиссии источников, так и в уменьшение в зимнее время толщины слоя перемешивания, что приводит к увеличению приземных концентраций.

В докладе рассматриваются модели оценивания регионального загрязнения территорий точечными и площадными источниками. Их построение проводится на основе асимптотических представлений полей концентраций с использованием решений полуэмпирического уравнения переноса и диффузии примесей в пограничном слое атмосферы, что позволяет получить модели оценивания с малым числом неизвестных параметров [3]. Апробация разработанных моделей выполнена на данных исследований аэрозольного загрязнения снежного покрова в окрестностях ряда крупных городов и промышленных площадок Западной и Восточной Сибири. Численный анализ данных наблюдений показал, что для восстановления поля концентрации в направлениях маршрутов отбора снега достаточно использовать лишь одну, две точки наблюдения.

Проведённые исследования послужили основой в поиске закономерностей процессов регионального загрязнения при использовании дистанционных методов. В результате были выявлены количественные связи между полями выпадения пыли и интенсивностью изменения тонов серого цвета снежного покрова на космических снимках в радиальных направлениях от крупных источников. Для них установлена функциональная связь, выражаемая логарифмической зависимостью.

Дальнейший численный анализ данных спутниковых наблюдений диоксида азота в окрестностях городов Прибайкалья и Забайкалья, включая Иркутск, Улан-Удэ, Читу, Гусиноозёрск, позволил установить достаточно высокий уровень согласия с асимптотическими оценками пространственной динамики изменений зимних среднемесячных концентраций до расстояний 100 – 200 км.

Выявленные количественные связи могут быть использованы для оперативного контроля выносов газовых и аэрозольных примесей от городов и крупных промышленных площадок. С привлечением гидродинамического моделирования атмосферной циркуляции и моделей оценивания предложенный подход позволит определять текущие эмиссии газовых примесей с территорий городов.

1. Прокачева В.Г., Усачёв В.Ф. Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
2. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного техногенного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорология и гидрология. 2013. № 3. С. 94–106.
3. Рапута В.Ф., Симоненков Д.В., Белан Б.Д., Ярославцева Т.В. Оценка выбросов диоксида серы в атмосферу Норильского промышленного района // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 465–470.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № 075-15-2024-533.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕРДЕЧНОМ РИТМЕ

С. Г. Куклин[1], О. А. Иванова[1], А. С. Аникин[2], А. Ю. Горнов[2]
ИГМАПО – филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО МЗ РФ,
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Сердечно-сосудистые заболевания продолжают оставаться одной из самых распространенных причин смертности населения России. Современный тренд исследований направлен на поиск персонифицированных подходов к лечению этих заболеваний (см. [1, 2]). Но, несмотря на множество исследований в стране и за рубежом, проблема персонализированной оценки динамики управления сердечным ритмом пока далека от разрешения. Специалисты вполне обосновано считают, что одной из основных технических проблем этой области исследований, является слабость разработанного к настоящему времени вычислительно-информационного инструментария, адаптированного для выделения индивидуальных характеристик ритма сердца (см. [3]).

В докладе обсуждается новая, уже четвертая, версия (см. [4–6]) научного прототипа программного комплекса, как предложенных нами программ, так и заимствованных в работах других специалистов, предназначенного для интегрирования полезных алгоритмов, методик и вычислительных технологий анализа непрерывных рядов интервалов между сердечными сокращениями (кардиоинтервалов). Запись электрокардиограммы проводили в условиях общепринятых нагрузочных проб у здоровых людей и пациентов с сердечно-сосудистой патологией. Основной задачей, решаемой данной программой, является диалоговая декомпозиция исходного временного ряда (10^5 и более кардиоинтервалов) на составляющие его сегменты: «стационарные» процессы, с выделением периодических компонент, и переходные процессы, с выделением характеристических участков. Экспертный анализ выполняется на основе трех вариантов временных рядов: исходного ряда и еще двух, полученных из исходного путем различных процедур фильтрации. После сегментации исходного ряда, с использованием предложенных методик когнитивной графики, последующий содержательный анализ выявленных характеристик сегментов проводится специалистом – медиком. Результаты работы докладывались на 11 Съезде Кардиологов Сибирского федерального округа («Сибирская кардиология – 2025») в июне 2025 г. и вызвали интерес сообщества специалистов.

1 Иванова О.А., Куклин С.Г. Скорость восстановления сердечного ритма после нагрузки при физической реабилитации кардиологических пациентов // Кардиоваскулярная терапия и профилактика, 17(2), 2008. С. 95–100.
2 Шелехова Ю.В., Храмцова Н.А., Онучина Е.В., Куклин С.Г. Динамики вариабельности сердечного ритма у мужчин работоспособного возраста, страдающих язвенной болезнью желудка и двенадцатиперстной кишки, ассоциированной и неассоциированной с инфекцией Helicobacter Pylori // ЭНИ Забайкальский мед. вестник. 2015, № 2. С. 13–16.
3 Ivanova O., Kuklin S., Titova A. Prognosis of long-term physical exercises efficacy in hypertonic patients // Journal of Hypertension. V. 35, e-Suppl. 2, September 2017. P. 215.
4 Куклин С.Г., Горнов А.Ю. Программный комплекс анализа данных холтеровского мониторирования для персонифицированной медицины // Ляпуновские чтения, 2021. С. 33.
5 Куклин С.Г., Аникин А.С. Интерактивная технология анализа данных холтеровского мониторирования // Ляпуновские чтения, 2023. С. 53–54.
6 Куклин С.Г., Аникин А.С., Горнов А.Ю. Графический пользовательский интерфейс для задачи анализа данных холтеровского мониторирования // Ляпуновские чтения, 2024. С. 126.

О ВОЗМОЖНОСТИ НЕЙТРИННОЙ ТОМОГРАФИИ ОБЪЕКТОВ: ВАРИАЦИИ УГЛОВ СМЕШИВАНИЯ

Д. А. Кучеров, В. П. Ломов
Иркутский государственный университет,
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
lomov.vl@icc.ru

Нейтрино – одни из самых необычных частиц в современной физике элементарных частиц. Они являются единственными нейтральными частицами с полуцелым спином, тогда как остальные частицы материи – частицы с полуцелым спином, являются заряженными частицами. Кроме этого, они участвуют только в слабом взаимодействии, что с одной стороны усложняет их регистрацию, а с другой стороны – позволяет им проходить через толщу материи сравнительно легко, и, вдобавок, практически не отклоняясь при распространении от прямой линии. Последнее свойство сейчас используется в астрофизических исследованиях по определению источников высокоэнергетических нейтрино, а также определения источников других событий, сопровождающихся всплеском рентгеновского, гамма и радиоизлучения.

Другой уникальной чертой нейтрино является необычный характер её взаимодействия с материей. Они существуют как бы в двух формах: флейворные нейтрино ν_α, которые рождаются при взаимодействии и бывают электронными, мюонными или тау-лептонными нейтрино, и массивные нейтрино ν_i, которые и распространяются в пространстве. В результате получается, что если в одном месте родилось нейтрино одного флейвора, то при регистрации в другой месте мы получим, что поток частиц как бы меньше, чем должно быть. Такое возможно только если массы нейтрино отличаются, что подтвердилось в экспериментах по регистрации солнечных нейтрино. Кроме этого эффекта – осцилляции нейтрино в вакууме, т.е. периодического перехода одного типа нейтрино в другой, есть и другой тип осцилляций, связанный с тем, что при движении в веществе нейтрино хоть слабо, но всё же взаимодействует с веществом, что усиливает осцилляции.

Таким образом, осцилляции нейтрино можно использовать как инструмент для анализа внутреннего строения объектов, которое мы не может получить никаким другим способом, или использовать его как дополнение к другим методикам. В связи в этим встаёт вопрос выбора типа нейтрино для регистрации, области энергии, а также определения насколько сильно неопределённости в массах и углах смешивания нейтрино влияют на поток частиц. В данной работе мы рассматриваем, как меняется вероятность «выживания» электронных нейтрино для солнечной модели.

В физике нейтрино их осцилляции описывается относительно просто – как переход от одного базиса – флейворных нейтрино к другому – массивных нейтрино:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U^*_{\alpha i}\,|\nu_i\rangle, \quad 1)$$

, где $U_{\alpha i}$ – матрица смешивания, PMNS-матрица

$$U = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13} \\ -s_{12}c_{13} - c_{12}s_{13}s_{23} & c_{13}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - s_{13}c_{12}c_{23} & -s_{23}c_{12} - s_{13}c_{23}s_{12} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}, \quad 2)$$

, где $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ – синусы углов смешивания θ_{ij}, а c_{ij} – соответственно косинусы этих углов. Вероятности перехода одного флейвора нейтрино в другой вычисляют по формуле

$$\langle P_{\alpha\beta}\rangle = \sum_j |U_{\beta j}|^2 \rho_j, \quad \rho_j = |\psi_j|^2, \qquad 3)$$

, где ψ_j – компонента в решении уравнения осцилляций в среде

$$i\frac{d\psi(r)}{dr} = H(r)\psi(r), \qquad H(r) = H_0 + v(r)W. \quad 4)$$

Здесь $v(r)$ – функция профиля плотности среды.

Это уравнение представляет собой матричное уравнение на комплекснозначную функцию. Ключевая особенность этого уравнения, что матрица $H(r)$ не коммутирует сама с собой в разных точках, поэтому это уравнение достаточно трудно для анализа, но имеет интересное численное решение [1, 2].

Для численного анализа вероятности «выживания» электронного нейтрино, т.е. вероятности того, что на Земле будет зарегистрировано электронное нейтрино, при условии, что оно родилось на Солнце, мы используем алгоритм M4, описанный и реализованный в работе [2]. В данной работе нас не интересует абсолютное значение вероятности, а только её относительное изменение, поэтому мы рассматриваем численное решение уравнение (4) варьируя углы смешивания* s_{12} и s_{13} на 10% от опорного значения.

Анализ полученных данных происходил относительно величины η

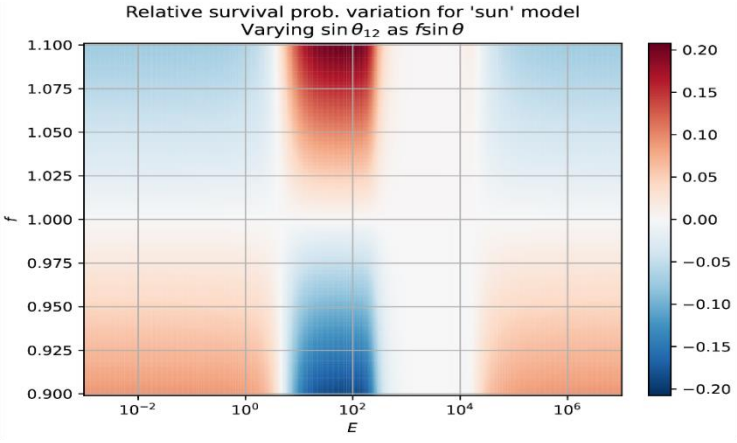
$$\eta = \frac{\mathrm{P}_f - \mathrm{P}_0}{\mathrm{P}_0}, \quad 5)$$

где P_0 – это вероятность выживания при опорном значении углов смешивания, а P_f – вероятность выживания с изменённым углом смешивания, согласно формуле

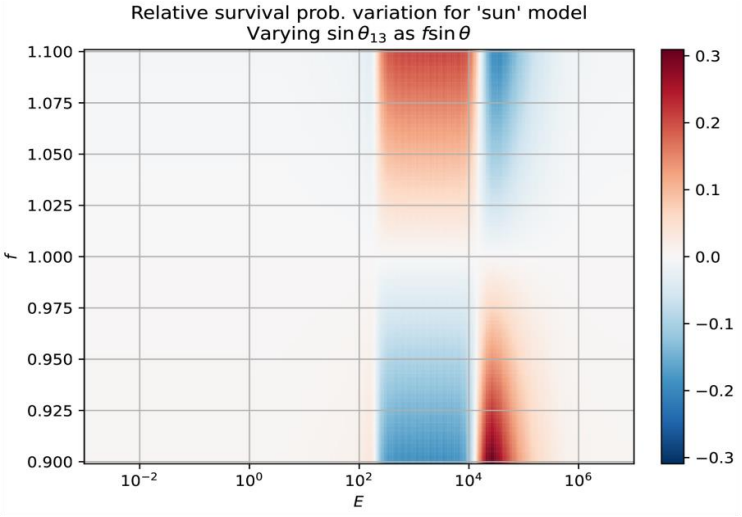
$$\sin\theta_f = f \cdot \sin\theta_0, \qquad 6)$$

где $\sin\theta_0$ – опорное значение угла смешивания. С целью определения влияния отдельных углов смешивания мы варьируем их независимо.

Результаты численного анализа данных приведены на рисунках ниже в виде «тепловых» графиков.



* В физике нейтрино принято говорить об углах смешивания, но оперировать при этом синусами этих углов.



Из графиков следует, что угол смешивания θ_{13} не оказывает заметного влияния на вероятность выживания в определённом диапазоне энергий. Кроме этого, области наибольшего влияния для углов θ_{12} и θ_{13} как бы дополняют друг друга.

Полученные результаты пока не позволяют однозначно выбрать какой-то определённый тип нейтрино и область энергии для томографии объектов, поскольку мы рассмотрели здесь только один флейвор (электронные нейтрино) и только рождение внутри объекта. Следует также рассмотреть случай прохождение нейтрино через сам объект, рассмотреть влияние вариации параметров среды на результат. Только полный набор этих данных позволит дать ответ на вопрос, какой тип нейтрино использовать, какую область энергии, но кажется очевидным, что выбор типа и области энергии будет также определяться и самим объектом.

1. Casas F., D'Olivo J. C., Oteo J. A. Efficient numerical integration of neutrino oscillations in matter // Phys. Rev. D. — 2016. — Vol. 94, no. 11. — P. 113008. — 1611.06814.
2. Lomov V. P., Shaydurova A. V. Using Magnus Expansion to Calculate the Neutrino Survival Probability // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2019. — Vol. 16, no. 6. — P. 569–577.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ БЕНЗ(А)ПИРЕНОМ АТМОСФЕРЫ ГОРОДОВ СИБИРИ*

А. А. Леженин, В. Ф. Рапута
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
lezhenin@ommfao.sscc.ru

Атмосферное загрязнения городов бенз(а)пиреном (БП) зависит от месторасположения и мощности эмиссии источников примесей, а также в значительной степени определяется метеорологическими условиями. Наиболее высокие уровни загрязнения атмосферы сибирских городов наблюдаются в холодные месяцы [1].

Использование среднемесячных концентраций БП допускает предположение о некотором постоянстве функционирования источников в окрестностях постов Росгидромета [2, 3]. Эмиссия загрязняющих веществ варьируется в зависимости от времени года. В холодные и тёплые месяцы соответственно происходит увеличение или уменьшение выбросов вредных примесей вследствие изменения режимов работы теплоэнергетических объектов и источников автономного теплоснабжения. Наибольший интерес представляют исследования по поиску закономерностей формирования полей концентраций примесей в холодные месяцы года (январь – март, октябрь – декабрь) на территориях городов. Следует отметить, что в эти периоды времени наблюдаются экстремально высокие концентрации БП, эмиссия примесей происходит в квазистационарном режиме. Вследствие этого представляется целесообразным изучение связей между измеренными концентрациями БП на постах Росгидромета для зимних периодов года. На рис. 1 представлены результаты попарного сравнения в рамках линейной регрессии и с использованием измерений среднемесячных концентраций БП на постах мониторинга в городах Ангарске, Усолье-Сибирском.

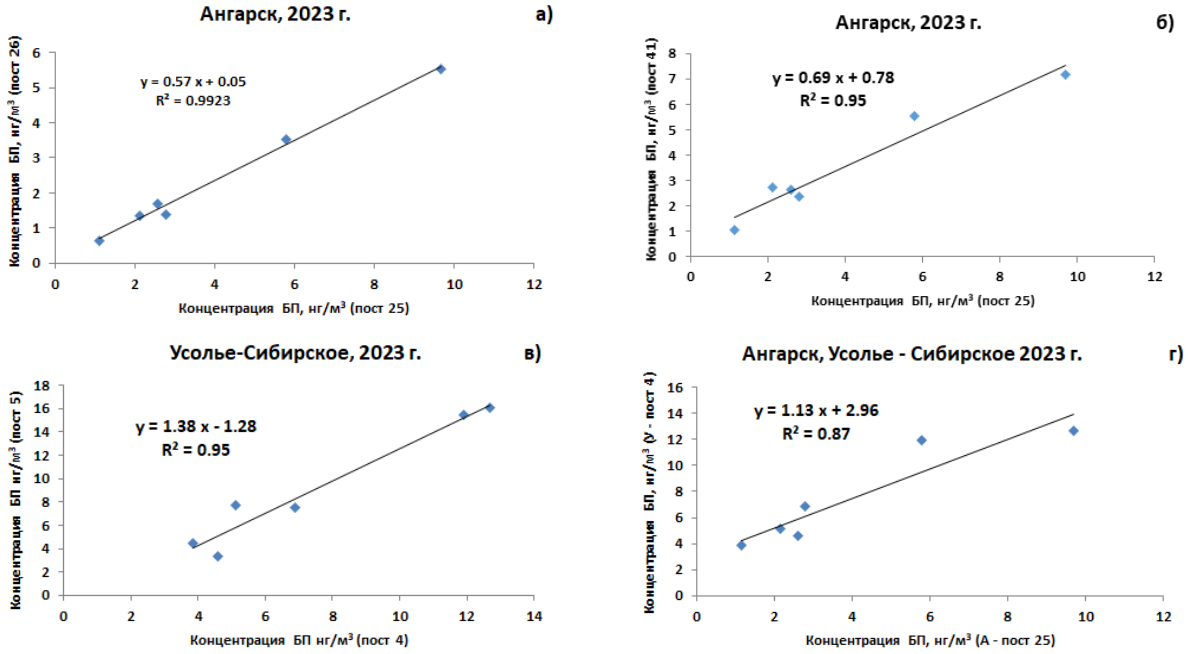


Рисунок 1. Попарные корреляции между измеренными концентрациями БП (нг/м^3) в январе-марте, октябре-декабре 2023 г. на постах № 25 и № 26 (а), № 25 и № 41 (б) г. Ангарска, на постах № 4 и № 5 (в) г. Усолье-Сибирское, на постах № 25 г. Ангарска и № 4 г. Усолье-Сибирское (г)

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № 075-15-2024-533.

Метеорологические условия являются важным фактором в формировании уровня загрязнения атмосферы [1]. Режим ветра над территорией, распределение температуры с высотой, в основном, определяют перенос и диффузию атмосферных примесей. Слабые ветра и штили в значительной степени способствуют их накоплению в нижней части атмосферы. Корреляционный анализ связей между среднемесячными концентрациями БП на постах Росгидромета г. Читы и повторяемостью штилей приведен на рис 2.

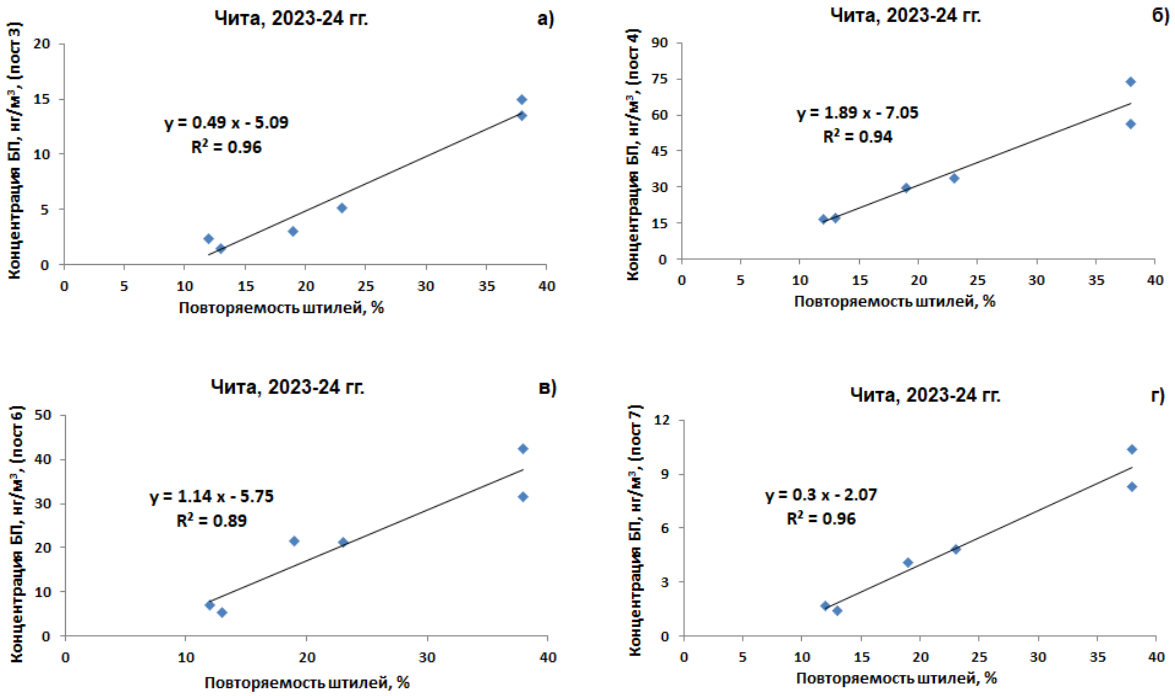


Рисунок 2. Связь между среднемесячной повторяемостью штилей (%) и концентрацией БП на постах № 3 (а), № 4 (б), № 6 (в), № 7 (г) города Читы в октябре – декабре 2023 г., январе – марте 2024 г.

Для холодных месяцев установлены высокого уровня корреляционные связи между среднемесячными концентрациями бенз(а)пирена на постах Росгидромета в городах Ангарске, Усолье-Сибирском, Улан-Удэ, Чите, Селенгинске. Возможность существования выявленных асимптотических закономерностей была показана в рамках предположения о квазистационарности функционирования городских источников атмосферных примесей. Полученные статистические зависимости между повторяемостями штилевых условий и концентрациями БП на постах городов Байкальской природной территории для холодных месяцев позволяют проводить оценку эффективности проводимых природоохранных мероприятий по снижению атмосферных выбросов вредных примесей, осуществлять контроль и восполнение данных наблюдений, получаемых с городских постов мониторинга.

1. Селегей Т.С. Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. Новосибирск: Наука, 2005.
2. Рапута В.Ф., Леженин А.А. Анализ данных мониторинга длительного загрязнения бенз(а)пиреном атмосферы г. Иркутска // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 06. С. 512-518.
3. Рапута В.Ф., Леженин А.А., Ярославцева Т. В. Оценка влияния штилевых условий на загрязнение бенз(а)пиреном атмосферы города Читы // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 06. С. 493–499.

О МОДЕЛИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО ГОРНО-ПЕРЕВАЛЬНОМУ УЧАСТКУ ТРАНССИБИРСКОЙ МАГИСТРАЛИ В РАЙОНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ*

А. А. Лемперт, А. Л. Казаков, М. Л. Жарков
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
zharkov@icc.ru

Транссибирская магистраль является основным видом транспорта для перевозки грузов между дальневосточными и западными регионами РФ. Значительная ее доля пролегает в сложных природно-климатических условиях и особо охраняемых территориях, что накладывает существенные ограничения на возможности развития магистрали [1]. Одним из наиболее проблемных является горно-перевальный участок от станции Гончарово до станции Слюдянка-1, расположенный на Байкальской природной территории (БПТ) и частично проходящий по берегу Байкала. Для движения грузовых поездов в гору на нем требуется дополнительное подталкивание. При этом из-за протяженности участка необходимо использовать нескольких десятков «толкачей».

Цель работы заключается в поиске «узких мест» участка и анализе эффективности мероприятий по его модернизации с учетом экологических требований. В качестве методов исследования используются математическое и компьютерное моделирование.

Математическая модель работы участка Гончарово – Слюдянка-1 имеет вид полуоткрытой сети массового обслуживания (ПСеМО). ПСеМО включает $S \geq 2$ систем массового обслуживания (узлов), каждая из которых имеет $1 \leq n_i < \infty$, $i \in S$ однородных каналов и $0 \leq m_i < \infty$ мест в очереди [2]. Часть заявок (внешние) поступает в систему из внешней среды и возвращается в нее после обслуживания, а остальные (внутренние) циркулирует внутри системы. В отличие от [2], в модели применяются специальные узлы: соединители – соединяют x заявок в одну и делители – выполняют обратное действие. В итоге, во-первых, отображается движение поездов сквозь участок и кольцевой маршрут «толкачей» на нем. Во-вторых, учитывается процесс подстановки «толкачей» к поездам и их отцепка, а также зависимость времени простоя поездов от скорости оборота «толкачей» и их числа на участке.

На основе численного исследования построенной ПСеМО установлены максимальная пропускная способность участка, определены «узкие места» в его структуре и оценено минимальное число «толкачей», необходимых для эффективной работы объекта. В частности, при межпоездном интервале в 8 мин. (текущий) запас пропускной способности участка составляет 10%, а при минимально возможном (6 мин.) – 19%. Для текущего объема поездопотоков и его увеличения на 5% достаточно 29-30 «толкачей», при росте на 10% необходимо 34 единиц, а на 15-20% – 36 единиц.

1. Об утверждении паспорта инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (третий этап)» : Распоряжение Правительства РФ от 20.04.2024 N 981-р.

2. Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling and Numerical Analysis of the Severobaikalsk Section of the Baikal-Amur Mainline Considering Environmental Points // Sustainability. 2025. Vol. 17(2). P. 392.

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

ИЗУЧЕНИЕ ЭКСТРАКЦИИ ИНТЕРЕСОВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВЕБ-ДАННЫХ

Ли Чон Хек*, Хвань Чхоль Хен, Ким Чан Хак, Чон Юн Ген
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
rjh9272@star-co.net.kp

Мы предлагаем новый подход к модели интереса пользователя через анализ истории браузера пользователя на веб-сайте, чтобы найти интерес к новичкам и предсказать интересы пользователя через расчёт веса на основе индекса, за которым следует личность абонента.

1. Введение

При использовании персонализированного информационного обслуживания он может быть понят как тип обслуживания, который удовлетворяет различным индивидуальным требованиям клиентов на основе анализа информации, привычки, символов и характеристик и т. д. [4]

На [1, 2, 3] провели исследование для извлечения интересов пользователя, применяя методы добычи веб-данных. Было предложено несколько подходов к персонализации веб-страниц[4], но не точно определить модель интереса пользователя и не более точно отражать сходство между пользователями, что затрудняет извлечение интересов абонентов.

Кроме того, он не полностью отражает личность пользователя, давая индикаторные значения веса в соответствии с этим.

2. Выбор интересов на основе модели интересов пользователя

2.1 Моделирование интересов пользователя

Мы формализуем модель интереса пользователя следующим образом.

$$U = (G, A, J, M, (K, I)) \quad (1)$$

Где G, A, J и M - общими атрибутами, представляющими пол, возраст, профессию и целостность, K - индекс, представляющий вид товара, и я представляю интересный вектор в соответствии с этим видом товара.

Это можно описать как уравнение 2.

$$I = (P, U, B, R, T_1, T_2, C) \quad (2)$$

Где U - продукт продукта, P - цена, R - снижение, B - марка, C - цвет, T_1 - первый тип, T_2 - второй индекс формы.

Модель продукта представляет собой объект, который пользователь интересует, поэтому в соответствии с моделью интереса пользователя форматируется следующим образом.

$$T = (P, U, B, R, T_1, T_2, C) \quad (3)$$

2.2 Извлечение интересов пользователя:

- Извлечение интересов пользователя на основе поведения браузера

Мы предложили два метода добычи интересов пользователей.

Первый подход – найти интересные свойства пользователя, если он достаточно хорош для браузера пользователя. Второй подход заключается в том, чтобы угадать свойства интереса от общих атрибутов пользователя, если поведение браузера пользователя недостаточно.

Во-первых, мы описываем, как найти атрибуты интересов пользователя из поведения браузера пользователя.

Например, мы используем историю просмотра для категории категории категории категории «Женское пальто».

В качестве браузера, который влияет на решение о пользовательском интересах, включает подробный вид (более 5 секунд), добавление поиска, корзина и покупка товаров. Очевидно, что для продуктов, купленных здесь, интерес пользователя является высоким.

Поэтому мы выделяем весовые значения для этих четырех браузеров из экспертов, которые занимаются операциями по электронной коммерции. Для поведения покупки 0,5, 0,25 для дополнительных действий, 0,15 для браузера Бадундиама и 0,1 для подробного поведения просмотра.

- Извлечение интересов новичков на основе кластеризации

Если вы новички, вы не можете правильно создавать модель интереса пользователя, если вы не достаточны для браузера.

Для решения этого мы исследовали, как извлечь свойства интереса от общих атрибутов, используя кластеризацию из предположения, что общие атрибуты, такие как профессия, пол, возраст и специальность пользователя, влияют на свойства интересов пользователя.

Во-первых, пользователи, богатые историей просмотра, кластеризованы в алгоритме K-среднего метода на основе матрицы интересов пользователя.

На основе матрицы общего атрибута пользователя пользователи (E) выбирают, как и новички(A) с помощью вычисления расстояния, как уравнение 4.

$$dist(A,E) = \frac{\sum_{j=1}^{4}\left(A_j \times E_j\right)}{\left(\sum_{j=1}^{4}({A_j}^2 \times {E_j}^2)\right)^{1/2}} \qquad (4)$$

Где J - общее количество атрибутов атрибутов, A_j и E_j - значения J-индекса целевого пользователя и других пользователей соответственно.

Затем пользователь, подобный целевому пользователю, будет производить.

Потом были выбраны для каждой группы выбранные n пользователи.

Когда N_j - количество, входящее в каждый кластер для выбранных n пользователях, $k = \mathrm{argmax}_j\, N_j$.

Мы считаем, что среднее значение группы m_k- является самым похожим на свойство интереса новичков.

Мы предлагаем, чтобы браузеры были более Q_{th} (обычно, Q_{th}=100) разработаны для поиска интереса пользователя на основе истории браузера, а в случае, если поведение браузера меньше, мы обнаружили интерес на основе браузеров, подобных браузерам.

Чем больше новичков браузер, тем больше он способствует более точно обнаруживать интерес пользователя.

Мы анализируем историю браузера до сих пор до 100 браузеров и истории браузеров в качестве подписчиков и анализируют интерес к поиску.

Теперь предположим, что количество браузеров новичков Q и что m_k- центральный вектор группы, который является наиболее похожим.

Затем мы анализируем Q браузеров, чтобы получить заинтересованный вектор пользователя I_0.

Потом, учитывая, что история браузера недостаточно, надежность для вектора интереса пропорциональна количеству истории браузера.

На основе этого мы определяем вектор интереса абонента, который не имеет поведения браузера, как и в уравнении 5.

$$I = \frac{\mathrm{Q}}{Q_{th}} \times I_0 + \left(1 - \frac{\mathrm{Q}}{Q_{th}}\right) \times m_k \qquad (5)$$

2.3. Экстракция интересов пользователя на основе матрицы интересов пользователя

Здесь мы изучаем, как предсказать продукт, который пользователь интересует, основанный на матрице интереса пользователя.

На основе модели интереса пользователя, построенной ранее, мы вычисляем интерес к следующему расчету расстояния, чтобы найти товары (S), аналогичные целевому продукту пользователя (G).

Каждый параметр, используемый для расчета, является значениями, которые уже были нормализованы.

$$dist(G,S) = \frac{\sum_{i=1}^{7}(w_i \times S_i \times G_i)}{(\sum_{i=1}^{7}({w_i}^2 \times {S_i}^2 \times {G_i}^2))^{1/2}} \qquad (6)$$

где j- номер индекса функции, а β_j - это весовое значение, назначенное j-индексу.

На основе истории веб-сайта электронной коммерции пользователя, важный вопрос в поиске интересов - определить, насколько он может представлять интерес пользователя.

Следовательно, мы назначаем вес каждому индексу функций.

Принятие веса приводит к более высокой точности прогнозирования для товара, которые будут рекомендованы выбранными параметрами функций.

Если пользователь особенно относится к определенному показателю, браузер пользователя часто повторяется в определенной степени.

Например, если пользователь предпочитает бренд и наслаждается списками, значение индекса этикетки пользователя будет повторяться в интервале индекса знака.

Кроме того, если вы придаете значение цене, индекс цен будет повторяться в течение определенного периода времени. Другими словами, чем выше индекс функции, тем меньше его дисперсия. То есть, вес индекса обратно пропорционален дисперсии соответствующего индекса.

Таким образом, на основе следующих уравнений можно рассчитать значение индикатора.

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^{n} r_i} \qquad (7)$$

Где r_i – обратное количество дисперсионных значений индекса i-го, w_i-значение веса для индекса i-го.

3. Экспериментальные результаты и анализ

Для оценки эффективности нашего предлагаемого бенефициара, мы выполнили эксперимент и оценили P@r, если количество браузеров было 0, 20, 40 и 80, соответственно, в 300 новых участников.

Как видно из экспериментальных результатов, для абонентов, богатых историей браузера, P@r в среднем на 2,9% выше, чем традиционные методы, а для новичков на 6,3% выше, и в целом значительно улучшилась производительность поиска.

Поскольку 10 товары отображаются на одной странице, мы сравнили эффективность нашего метода с предыдущими методами из среднего значения P@r, назначенного 10, 20 и 30, поскольку r был назначен на 10, 20 и 30.

Результаты показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Оценки мошности поиска-1

Индекс оценки	Предыдущий метод[4]	Предлагаемый метод
P@10	78%	82%
P@20	83.3%	85%
P@30	85.1%	87%

Потом, для оценки эффективности добычи интересов в нашем предложенном новичке 300 участников были протестированы и оцениваются P@r, в которых количество браузеров было 0, 20, 40 и 80 соответственно.

Результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Оценки мошности поиска-2

Индекс оценки	Предыдущий метод[4]	Предлагаемый метод
P@10	56%	64%
P@20	60%	67%
P@30	61%	68.5%

Заключение

Мы предлагаем новый подход к модели интереса пользователя на веб-сайте, чтобы найти интерес к новому абонентам и предсказать интерес пользователя через расчёт веса индекса в соответствии с личностью абонента.

Наш подход может предсказать интерес пользователя с более высокой точностью не только для абонентов, которые богаты историей просмотра, но и для новичков, которые не имеют истории браузера.

1. Asem Omari and Stefan Conrad. On Controlling and Prediction of Next Best Sellings through Periodical Mining for {Semi/Non }-interesting Association Rules. In Proceedings of the 1st International Conference on Digital Communications and Computer Applications (DCCA2007), pages 271–275. University of Science and Technology, Irbid, Jordan, March 2007.
2. Robert Cooley. The Use of Web Structure and Content to Identify Subjectively Interesting Web Usage Patterns. ACM Transactions on Internet Technology, 3(2):93–116, 2003.
3. Michael Hahsler and Kurt Hornik. New Probabilistic Interest Measures for Association Rules. In Intelligent Data Analysis, volume 11, pages 437–455,2007.
4. Asem Omari aus Irbid, Data Mining for Retail Website Design and Enhanced Marketing, 2008, 1~120pp.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДАННЫХ И МАКЕТА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ БАЗЫ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫХ ДАННЫХ*

М. А. Лунина
Иркутский государственный университет, Институт земной коры СО РАН
lounina2006@inbox.ru

Информационно-вычислительные технологии применяются во многих областях наук, в том числе в геологии. В ИЗК СО РАН за многие годы накоплен большой объем геолого-структурных данных, полученных в отдельных точках наблюдения. К ним относятся замеры элементов залегания трещин, разломных зон, складок, будин и других деформаций [1]. Данные с разных мест собираются годами, однако без цифровизации их очень сложно хранить и использовать в дальнейшем. В связи с этим возникла необходимость создания унифицированной и удобной базы данных геолого-структурной информации с элементами визуализации. Такая разработка позволит оптимизировать хранение уже проведенных измерений и работу с ними. Станет проще проводить мониторинг геологических изменений и готовиться к новым изысканиям. Данные не будут теряться во времени и станут более доступными для специалистов, а базовую информацию из веб-приложения можно будет использовать в специализированных геоинформационных пакетах и в образовательных целях.

Цель настоящей работы разработать модель базы данных и макет веб-приложения для ее дальнейшей реализации.

Для выполнения настоящей работы проведен обзор СУБД и выбраны подходящие библиотеки для визуализации приложения. Таблица с геолого-структурными данными, на основе которой разработана реляционная модель, была предоставлена главным научным сотрудником ИЗК СО РАН, д.г.-м.н. О.В. Луниной.

В результате для реализации базы данных в качестве СУБД выбрана объектно-реляционная модель PostgreSQL, так как в ней удобно работать с большим количеством информации. Она обладает высокой производительностью и имеет удобное для поставленной задачи расширение PostGIS [2]. Для взаимодействия с Postgress SQL будет использоваться библиотека psycopg2 языка программирования Python [3]. Визуализация приложения будет создана с помощью языка Java-script, библиотеки OpenLayers. Для написания бэкенда выбрана библиотека flask.

PostGIS и Openlayers позволят выгружать данные в формате GeoJson, что полезно для организации будущих исследований. Веб-приложение планирует включать в себя визуализацию разрывов и сопутствующих деформаций на карте (в геоинформационном пространстве) в виде специализированных значков с возможностью выгрузки элементов залегания нарушений в 2д и 3д виде для дальнейшей работы с ними в специализированных программных пакетах (QGis, Petrel, LeapFrog, etc).

Планируется, что функции приложения будут частично в открытом доступе, а полный пакет данных будет предоставляться по запросу. На данный момент сформирована реляционная модель данных, часть данных перенесена в таблицу «Общие сведения о точке наблюдения».

1. Fossen H. Structural geology. Second Edition. United Kingdom.: University Printing House, Cambridge CB2 8BS, 2016.
2. Рогов Е. В. PostgreSQL 15 изнутри. М.: ДМК Пресс, 2023.
3. Кольцов Д. М. Python. Полное руководство. СПб.: Изд-во: Наука и техника, 2022.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук на 2021–2025 гг., проект № FWEF-2021-0009.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТОРА ШЕПАРДА В ФАКТОРНОМ АНАЛИЗЕ РИСКОВ РАЗВИТИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ РЕСПИРАТОРНОГО ТРАКТА

С. А. Лыхин[1], Т. С. Зароднюк[2]
[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет
[2]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
semenjkpo@gmail.com, tz@icc.ru

Современный анализ данных опирается на применение эффективных методов аппроксимации и интерполяции, с учетом высоких размерностей и отсутствия регулярной заданной сетки. Одним из таких подходов является технология анализа данных с помощью функции Шепарда – универсальный способ интерполяции, основанный на взвешенном среднем значении известных точек с учетом их расстояния до точки интерполяции. Работа посвящена экспериментальному изучению свойств оператора Шепарда и его модификаций (с добавлением производной и сглаживающих компонент), а также его использованию при оценке значимости факторов в прикладной задаче оценки рисков поражения респираторного тракта пациентов с гастроэзофагеальной рефлюксной болезнью. Для реализации предложенной методики на языке программирования Python использован классический вид оператора Шепарда [1, 2], результат его применения для интерполяции невыпуклой функции по 50 точкам приведен на рисунке.

$$F(x) = \begin{cases} f_i, \text{если } x = x_i; \\ \sum_{i=1}^{k} f_i / \|x - x\|^4 \Big/ \sum_{i=1}^{k} 1/\|x - x\|^4, \text{если } x \neq x_i. \end{cases}$$

Решение прикладной задачи оценки рисков развития хронических заболеваний верхних отделов респираторного тракта опиралось на использование программной реализации оператора Шепарда, позволяющей построить интерполяцию исследуемых данных и выбрать среди них наиболее значимые путем последовательного удаления одного из 21 факторов из обучающей выборки. Проведена также оценка ускорения вычислительного процесса построения модели в зависимости от исключения того или иного фактора из обучающей выборки. Наибольшего ускорения удалось достичь при удалении факторов 14, 15 и 18 (рис. 1), что может указывать на необходимость оценить их значимость при построении модели и по возможности исключить из рассмотрения.

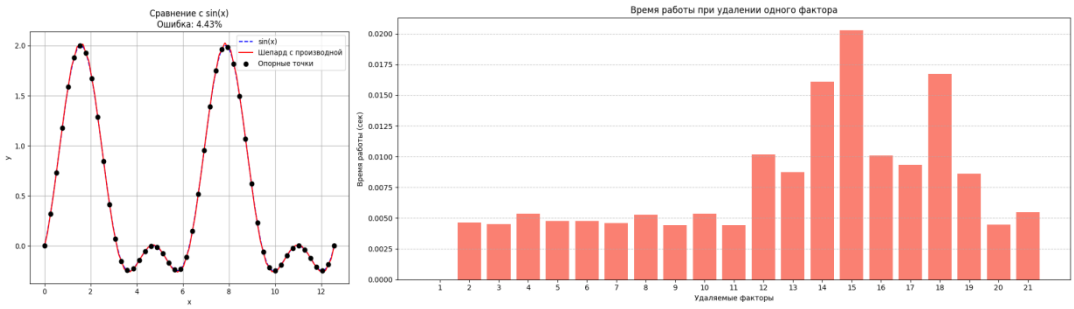


Рисунок 1. Результаты интерполяции невыпуклой функции с использованием оператора Шепарда; влияние исключения факторов на скорость вычислительного процесса (при решении задачи факторного анализа развития хронических заболеваний респираторного тракта).

Реализованная вычислительная технология позволила выполнить факторный анализ данных в задаче оценки рисков развития хронических заболеваний верхних отделов респираторного тракта.

1. Shepard D. A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data // Proceedings of the 1968 ACM National Conference. C. 517–524.
2. William J. Gordon and James A. Wixom. Shepard's Method of "Metric Interpolation" to Bivariate and Multivariate Interpolation. Mathematics of computation, 32(141) 1978, P. 253–264.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ МЕТАНГИДРАТОВ, СФОРМИРОВАВШИХСЯ В УСЛОВИЯХ ПОКРОВНОГО ОЛЕДЕНИЯ*

В. В. Малахова
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
malax@sscc.ru

Вечная мерзлота занимает большую площадь в Арктическом регионе, как в континентальной области, так и на обширных территориях шельфа арктических морей [1]. Многолетняя мерзлота содержит большое количество газа в гидратной форме [2]. Метангидраты могут образовываться и существовать внутри зоны стабильности гидратов метана (далее – ЗСГМ) в течение длительного времени. Возможной причиной формирования гидратов в верхних горизонтах криолитозоны является барический фактор, вызванный, например, вышележащим ледниковым щитом или морской трансгрессией [3, 4]. В результате разрушения ледника, газовые гидраты могли оказаться выше современной границы зоны стабильности (на глубинах до 100 м) и сохраниться в метастабильном состоянии. Считается, что метастабильные гидраты образовались в геологическом прошлом (десятки тысяч лет назад) в благоприятных термобарических условиях, но в настоящее время расположены вне современной ЗСГМ и существуют благодаря проявлению эффекта самоконсервации газовых гидратов [5]. Наличие метангидратов в верхних слоях мерзлых толщ в неравновесных условиях рассматривается как одна из возможных причин постоянных газопроявлений при эксплуатации скважин на газовых месторождениях Ямала. Кроме того, это создает риски при освоении недр арктического шельфа [4].

Цель исследования – разработка численной модели для изучения условий дестабилизации реликтовых гидратов метана в периоды покровного оледенения и трансгрессии моря.

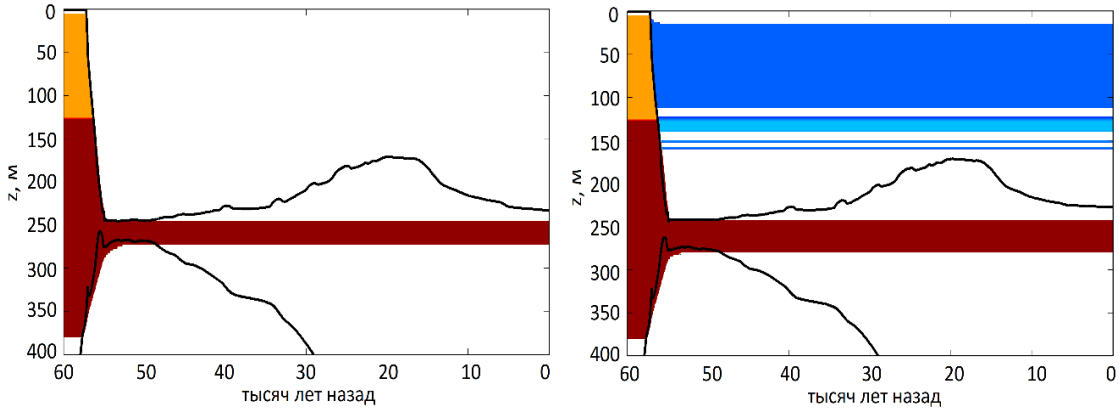
Проведено моделирование температурного режима пород с расчетом термобарических условий и диссоциации гидрата. В первом эксперименте рассмотрен процесс разложения газогидратов в пористой среде с учетом поглощения тепла, что способствует замедлению этого процесса. Показано, что гидратная залежь с гидратонасыщенностью менее 10% при нарушении условий устойчивости полностью разрушается. При более высокой гидратонасыщенности (20% и выше) потребовалось больше времени для разложения гидрата, что способствовало охлаждению пород вблизи фронта разложения и замедлению диссоциации. Однако в этом случае гидрат сохранился в пределах ЗСГМ, рис.1а.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в поровом пространстве мерзлых пород метангидраты могут продолжительное время находиться в состоянии самоконсервации при отрицательной температуре, не превышающей -2-4 °С [6].

Во втором эксперименте исследовано влияние эффекта самоконсервации на процесс деградации гидрата. В численных экспериментах предполагалось, что при температуре грунта ниже -4°С процесс диссоциации затухает и 30% порового гидрата сохраняется до момента дополнительного роста температуры пород. Согласно полученным результатам за счет эффекта самоконсервации возможно сохранение

* Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0003.

внутримерзлотных гидратов метана с остаточной гидратонасыщенностью 7-5% на глубине 10-100 м, рис.1б. Выполненное численное моделирование позволяет предположить, что сформированные в период покровного оледенения гидраты могут сохраниться в метастабильном состоянии до наших дней в толще мерзлых пород на глубинах 10-200 м при температуре пород ниже -4 °С.



а б

Рисунок 1. Изменение гидратонасыщенности (h, %) пород по результатам расчетов: (а) – первый эксперимент без учета самоконсервации и (б) – второй эксперимент с учетом самоконсервации метангидратов при температуре -4 °С. Черная кривая показывает границы ЗСГМ

1. Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrilov A.V., Eliseeva A.A., Tipenko G.S. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // Geo-Mar. Letters. 2005. V. 25. № 2–3. P. 167–182.
2. Malakhova V.V., Eliseev A.V. The role of heat transfer time scale in the evolution of the subsea permafrost and associated methane hydrates stability zone during glacial cycles // Global Planetary Change. 2017. V. 157. P. 18– 25.
3. Gavrilov A., Malakhova V., Pizhankova E., Popova A. Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone of the Glacial Part of the East-Siberian Shelf // Geosciences. 2020. V. 10. № 12. P. 484.
4. Arzhanov M.M., Malakhova V.V., Mokhov I.I. Modeling thermal regime and evolution of the methane hydrate stability zone of the Yamal peninsula permafrost // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. V. 31. № 4. P. 487-496.
5. Чувилин Е.М., Кривохат Е.О., Буханов Б.А., Екимова В.В., Мухаметдинова А.З. Дестабилизация внутримерзлотных газогидратов при их взаимодействии с криопэгами. Результаты экспериментального моделирования // Георесурсы. 2025. Т. 27. № 3. С. 77–88.
6. Chuvilin E., Bukhanov B., Davletshina D., Grebenkin S., Istomin V. Dissociation and self-preservation of gas hydrates in permafrost // Geosciences. 2018. V. 8. P. 431-442.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ЧИСЛЕННОМУ РЕШЕНИЮ ГЕКСАМАТРИЧНЫХ ИГР

У. Х. Малков
Центральный экономико-математический институт РАН
i@umalkov.ru

Стандартная постановка задач невыпуклой оптимизации направлена на поиск *хотя бы одного* глобального решения. Но в игровых задачах требования могут быть более высокие: найти все возможные стратегии. В переводе на язык экстремальных задач это означает *найти все локальные экстремумы* [2, 3].

Выполнен поиск всех точек равновесия Нэша с алгоритмом локального поиска в игре 3 лиц мульти-матричной постановке с использованием программных сред Python с применением алгоритмов, описанных в [1, 4–7]. Игра нескольких лиц является задачей квадратичного программирования. Исследовалась игра с 10 стратегиями. Мы искали экспериментально максимально большее количество точек равновесия Нэша при помощи локального поиска в игре 3 лиц в мульти-матричной постановке. Искали точки равновесия в игре 3 лиц с 10 стратегиями при разной степени плотности покрытия пространства смешанных стратегий при помощи алгоритма локального поиска (1, 2, 3, 4 и 5). Выбрали четыре степени покрытия пространства смешанных стратегий стартовыми точками для запуска локального спуска к точке равновесия: **1**. **Редкая сетка** – все комбинации двух чистых стратегий (первого и второго игрока), $m \cdot m$ – штук, m – количество стратегий. **2. Покрытие плотнее** – 5 выпуклых комбинаций пар стратегий первого и второго игрока: $(m \cdot (m-1)/2) \cdot (m \cdot (m-1)/2) \cdot 5 \cdot 5$ – стартовых точек. 3. **Второе плотное покрытие** – 12 выпуклых комбинаций трех стратегий второго и третьего игрока: $(m \cdot (m-1) \cdot (m-2)/6) \cdot (m \cdot (m-1) \cdot (m-2)/6) \cdot 12 \cdot 12$ – стартовых точек. **4. Третье плотное покрытие** – 16 выпуклых комбинаций четырёх стратегий второго и третьего игрока: $(m \cdot (m-1) \cdot (m-2) \cdot (m-3)/24) \cdot (m \cdot (m-1) \cdot (m-2) \cdot (m-3)/24) \cdot 16 \cdot 16$ – стартовых точек.

Расчет 1. Найдено 6 точек равновесия после 100 локальных спусков.

Расчет 2. Найдено 11 новых точек равновесия после 21025 локальных спусков.

Расчет 3. Найдено 30 новых точек равновесия после 1349757 локальных спусков.

Расчет 4. Найдено 55 новых точек равновесия после 7.6+ миллионов локальных спусков.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Малков, Устав Херманович. Решение некоторых задач линейного программирования // диссертация кандидата физико-математических наук: 01.00.00. Москва, 1962. 60 с.
2. Konno H. A cutting plane algorithm for solving bilinear programs. Mathematical Programming,1976, 11:14–27.
3. Orlov A., Strekalovsky A., Batbileg S. On computational search for Nash equilibrium in hexamatrix games, Optimization Letters. 2014. v.10, No. 2: 369–381.
4. Golshtein E.G., Malkov U.Kh., Sokolov N.A. Efficiency of an approximate algorithm to solve finite three-person games (a computational experience) // Economica i Matematicheskie Metody, 2017, 50(1).
5. Малков У.Х., Соколов Н.А. Метод Лемке-Хаусона для решения конечных бескоалиционных игр 3 лиц в частной постановке // Вестник ЦЭМИ РАН, 2018 № 3.
6. Гольштейн Е.Г., Малков У.Х., Соколов Н.А. Эффективность приближенного метода решения конечной игры трех лиц (вычислительный опыт) // Экономика и математические методы, 2017, том 53, № . С. 94–107.
7. Malkov U. Finding all Nash points and weak equilibrium in Multi-person games. Vestnik CEMI, 2025. 8(1) DOI: 10.33276/S265838870034645-2.

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТРИК ИНФРАСТРУКТУРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА В ГИБРИДНУЮ СИСТЕМУ МОНИТОРИНГА

В. М. Марданшин
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
Институт математики и информационных технологий
Иркутского государственного университета
vova_mardanshin@mail.ru

Современные суперкомпьютерные центры представляют собой сложные распределённые системы, включающие сотни вычислительных узлов, сетевые устройства, системы хранения данных и сервисы поддержки пользователей. Управление такой инфраструктурой требует высокой степени наблюдаемости – способности получать целостное представление о состоянии оборудования и сервисов в реальном времени.

Целью работы является создание гибридной системы мониторинга вычислительного кластера, объединяющей метрики инженерной инфраструктуры, системные логи и события для повышения эффективности управления.

В основе решения лежит стек инструментов с открытым исходным кодом: Prometheus, Grafana, Loki, а также использование SNMP-протокола для сбора аппаратных метрик с сетевого оборудования. Для нестандартных источников данных разработаны специализированные экспортеры, выполняющие парсинг XML-данных и передачу обработанных метрик в Prometheus через сервер Flask.

Логи системных сервисов агрегируются и индексируются в Loki, что позволяет объединять численные метрики и текстовые события в единую панель наблюдаемости. Такая интеграция обеспечивает сквозную корреляцию данных и ускоряет диагностику инцидентов.

На текущем этапе реализованы и успешно интегрированы следующие модули:

– SNMP-агенты для сбора показателей состояния инженерного оборудования (температура, энергопотребление и т.д.);

– Flask-приложение для обработки XML-данных и отправки метрик в Prometheus;

– Telegram-бот для уведомления администраторов о состоянии чиллеров и возможных сбоях;

– Grafana-дашборды для визуализации параметров системы охлаждения и общей инфраструктуры.

Ведётся работа по расширению мониторинга на другие инженерные узлы – батарейные шкафы, кондиционеры и распределительные панели. Параллельно осуществляется сбор системных метрик и логов вычислительных узлов, что позволяет формировать целостную картину состояния кластера.

Проделана большая работа по унификации форматов данных, поступающих из разных источников. SNMP-устройства и пользовательские сервисы формируют разнородные данные, которые проходят предварительную обработку в Flask-приложении. Использование единого пространства имён и схемы меток Prometheus обеспечивает корректную агрегацию и фильтрацию метрик при визуализации и аналитике.

Интеграция инженерных и вычислительных метрик создаёт основу для перехода от классического мониторинга к наблюдаемости (observability) –

возможности не только фиксировать сбои, но и анализировать их причины на основе совокупных данных.

Разработанная система уже внедрена в тестовую инфраструктуру суперкомпьютерного центра и демонстрирует устойчивую работу, гибкость и потенциал масштабирования.

1. Тарасов А. Г. Расширяемая система мониторинга вычислительного кластера // Вычислительные методы и программирование. 2009. Т. 10. С. 147–158.
2. Барабанов А. В., Барабанов В. Ф., Белых М. А. Инструменты мониторинга производительности вычислительной системы // Молодой ученый. 2020. № 17 (307). 11 с.

ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЦВЕТНОГО ПЛАЗМОНА В НЕАБЕЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ В РАМКАХ КАНОНИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Ю. А. Марков[1,2], М. А. Маркова[1,2], Н. Ю. Марков[1,2]
[1]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
[2] Иркутский государственный университет
markov@icc.ru, markova@icc.ru, nyumarkov@gmail.com

В данной работе проведено обобщение классического гамильтонова формализма, проведенного в [1, 2], с целью описания процессов взаимодействия коллективных возбуждений, подчиняющихся бозе-статистике, с двумя жесткими цветозаряженными частицами. Это нетривиальное обобщение дает возможность изучить новый процесс взаимодействия, связанный с тормозным излучением цветных плазмонов в кварк-глюонной плазме.

Получены специальные канонические преобразования в виде функционального разложения по компонентам нормальной бозонной полевой переменной $c_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha)a}$ и переменным Q_α^a, $\alpha = 1, 2$, описывающим цветовую степень свободы жестких частиц:

$$a_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha)a} = c_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha)a} + \sum_{\beta=1,2} F_k^{(\alpha,\beta)}\, Q_\beta^a + \sum_{\alpha_1,\alpha_2} \int d\boldsymbol{k}_1 d\boldsymbol{k}_2 \Big[V_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{k}_1,\boldsymbol{k}_2}^{(1|\alpha,\alpha_1,\alpha_2)a\,a_1\,a_2}\; c_{\boldsymbol{k}_1}^{(\alpha_1)a_1}\, c_{\boldsymbol{k}_2}^{(\alpha_2)a_2} +$$
$$+ V_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{k}_1,\boldsymbol{k}_2}^{(2|\alpha,\alpha_1,\alpha_2)a\,a_1\,a_2}\; c_{\boldsymbol{k}_1}^{*(\alpha_1)a_1}\, c_{\boldsymbol{k}_2}^{(\alpha_2)a_2} + V_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{k}_1,\boldsymbol{k}_2}^{(3|\alpha,\alpha_1,\alpha_2)a\,a_1\,a_2}\; c_{\boldsymbol{k}_1}^{*(\alpha_1)a_1}\, c_{\boldsymbol{k}_2}^{*(\alpha_2)a_2} \Big] + \dots ,$$

Q_α^a

$$+ \sum_{\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3} \int d\boldsymbol{k}_1 d\boldsymbol{k}_2 \Big[M_{\boldsymbol{k}_1,\boldsymbol{k}_2}^{(1|\alpha,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3)a\,a_1\,a_2\,a_3}\; c_{\boldsymbol{k}_1}^{(\alpha_1)a_1} c_{\boldsymbol{k}_2}^{(\alpha_2)a_2} Q_{\alpha_3}^{a_3} +$$
$$+ M_{\boldsymbol{k}_1,\boldsymbol{k}_2}^{(2|\alpha,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3)a\,a_1\,a_2\,a_3}\; c_{\boldsymbol{k}_1}^{*(\alpha_1)a_1} c_{\boldsymbol{k}_2}^{(\alpha_2)a_2} Q_{\alpha_3}^{a_3}$$
$$+ \dots .$$

Полученные преобразования позволяют исключить гамильтониан взаимодействия третьего порядка $H^{(3)}$ и получить явный вид эффективного гамильтониана пятого порядка $\mathcal{H}^{(5)}$, который описывает процесс тормозного излучения цветного плазмона при взаимодействии двух жестких частиц:

$$\mathcal{H}^{(5)} = \sum_\rho \int d\boldsymbol{k}\, T_{\boldsymbol{k}}^{(\rho)a\,a_1\,a_2}(t)\, c_{\boldsymbol{k}}^{(\rho)}\, Q_1^{a_1} Q_2^{a_2} + \sum_\rho \int d\boldsymbol{k}\, T_{\boldsymbol{k}}^{*(\rho)a\,a_1\,a_2}(t)\, c_{\boldsymbol{k}}^{*(\rho)}\, Q_1^{a_1} Q_2^{a_2}.$$

Здесь эффективная амплитуда $T_{\boldsymbol{k}}^{(\rho)a\,a_1\,a_2}(t)$ имеет следующий вид:

$$T_{\boldsymbol{k}}^{(\rho)a\,a_1\,a_2}(t) = \int d\boldsymbol{q}\, T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{(\rho)a\,a_1\,a_2}(t),$$

, где “плотность” амплитуды $T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{(\rho)a\,a_1\,a_2}(t)$ представляет собой сумму двух различных по физическому содержанию частей $T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{(\rho)a\,a_1\,a_2}(t) = T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{\mathrm{I}(\rho)a\,a_1\,a_2}(t) + T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{\mathrm{II}(\rho)a\,a_1\,a_2}(t)$, первая из которых имеет следующую структуру:

$$T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{\mathrm{I}(\rho)a\,a_1\,a_2}(t) = -i\, f^{a\,a_1\,a_2} \frac{1}{\omega_{\boldsymbol{k}}^l - \boldsymbol{v}_\rho \cdot \boldsymbol{k}} \left(\frac{1}{\omega_{\boldsymbol{q}}^l - \boldsymbol{v}_1 \cdot \boldsymbol{q}} + \frac{1}{\omega_{\boldsymbol{q}}^l - \boldsymbol{v}_2 \cdot \boldsymbol{q}} \right)$$
$$\times \Big[\phi_{\boldsymbol{q}}^{(1)}(t) \phi_{\boldsymbol{q}}^{*(2)}(t) \phi_{\boldsymbol{k}}^{(1)}(t) + \phi_{\boldsymbol{q}}^{*(1)}(t) \phi_{\boldsymbol{q}}^{(2)}(t) \phi_{\boldsymbol{k}}^{(1)}(t) - \phi_{\boldsymbol{q}}^{(2)}(t) \phi_{\boldsymbol{q}}^{*(1)}(t) \phi_{\boldsymbol{k}}^{(2)}(t) -$$

$$- \phi_{\boldsymbol{q}}^{*(2)}(t)\,\phi_{\boldsymbol{q}}^{(1)}(t)\,\phi_{\boldsymbol{k}}^{(2)}(t)\Big],$$

в то время, как вторая часть может быть представлена в виде

$$T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{\mathrm{II}(\rho)a\,a_1\,a_2}(t) = \mathcal{V}_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q},\boldsymbol{k}-\boldsymbol{q}}^{*a\,a_1\,a_2}(t)\left(\frac{1}{\omega_{\boldsymbol{q}}^{l} - \boldsymbol{v}_1\cdot\boldsymbol{q}} + \frac{1}{\omega_{\boldsymbol{q}}^{l} - \boldsymbol{v}_2\cdot\boldsymbol{q}}\right)\times$$

$$\times\left(\frac{1}{\omega_{\boldsymbol{k}-\boldsymbol{q}}^{l} - \boldsymbol{v}_1\cdot(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{q})} + \frac{1}{\omega_{\boldsymbol{k}-\boldsymbol{q}}^{l} - \boldsymbol{v}_2\cdot(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{q})}\right)\left[\phi_{\boldsymbol{q}}^{(1)}(t)\phi_{\boldsymbol{k}-\boldsymbol{q}}^{(2)}(t) - \phi_{\boldsymbol{q}}^{(2)}(t)\phi_{\boldsymbol{k}-\boldsymbol{q}}^{(1)}(t)\right]$$

На рис. 1 дана диаграммная интерпретация некоторых членов в эффективных амплитудах $T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{\mathrm{I}(\rho)a\,a_1\,a_2}$ и $T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{\mathrm{II}(\rho)a\,a_1\,a_2}$.

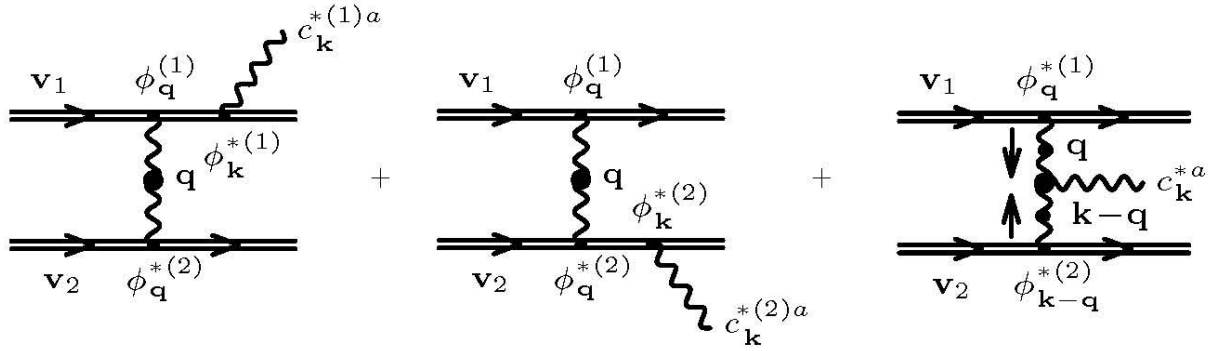


Рисунок 1. Эффективная амплитуда $T_{\boldsymbol{k}_1,\boldsymbol{k}_2}^{(\rho)a\,a_1\,a_2}$ для процесса тормозного излучения плазмона. Черный кружок обозначает HTL-ресуммирование, а двойные линии – жесткие частицы

Если ансамбль взаимодействующих бозе-возбуждений со слабым уровнем нелинейности имеет случайные фазы, то его можно описать статистически, введя одновременную корреляционную функцию для медленных компонент бозонного поля следующего вида:

$$\langle c_{\boldsymbol{k}}^{*(\alpha)a}(\tau)c_{\boldsymbol{k}'}^{(\alpha')a'}(\tau)\rangle = \mathcal{N}_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha,\alpha')aa'}(\tau)\,\delta(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{k}'), \qquad (1)$$

где $\langle\cdot\rangle$ – усреднение по ансамблю, τ – медленное время. Матричную функцию $\mathcal{N}_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha,\alpha')aa'}(\tau)$ интерпретируем как плотность числа плазмонов в эффективном двухчастичном и цветовом пространствах.

Выписаны уравнения Гамильтона для бозонных нормальных переменных $c_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha)a}$, $c_{\boldsymbol{k}}^{*(\alpha)a}$ и цветных зарядов Q_α^a. Для случая непрерывных сред в качестве определения скобки Ли-Пуассона было выбрано выражение:

$$\sum_{\rho=1,2}\int d\,\boldsymbol{k}'\left\{\frac{\delta a_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha)a}}{\delta c_{\boldsymbol{k}'}^{(\rho)\mathrm{c}}}\frac{\delta a_{\boldsymbol{k}''}^{*(\beta)b}}{\delta c_{\boldsymbol{k}'}^{*(\rho)c}} - \frac{\delta a_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha)a}}{\delta c_{\boldsymbol{k}'}^{*(\rho)\mathrm{c}}}\frac{\delta a_{\boldsymbol{k}''}^{*(\beta)b}}{\delta c_{\boldsymbol{k}'}^{(\rho)c}}\right\} + i\sum_{\rho=1,2}\frac{\delta a_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha)a}}{\delta Q_\rho^c}\frac{\delta a_{\boldsymbol{k}''}^{*(\beta)b}}{\delta Q_\rho^{c'}}f^{cc'd}Q_\rho^d =$$
$$= \delta^{ab}\delta^{\alpha\beta}\,\delta(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{k}'').$$

Первый член в правой части – это стандартная каноническая скобка, а $f^{cc'd}$ – антисимметричные структурные константы алгебры Ли $\mathcal{su}(N)$. На основе уравнений Гамильтона получено матричное кинетическое уравнение для функции $\mathcal{N}_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha,\alpha')aa'}(\tau)$:

$$\delta(\boldsymbol{k}-\boldsymbol{k}')\frac{\partial\mathcal{N}_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha,\alpha')aa'}(\tau)}{\partial\tau}$$

$$= - T_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha)}(t') \left(\sum_{\rho} \int T_{\boldsymbol{k}}^{*(\rho)}(t') dt' \right) \left(T^{a_2} T^{e_1} T^{a_2'} \mathcal{N}_{\boldsymbol{k}'}^{(\rho,\alpha')} \right)^{aa'} \langle Q_2^{a_2'}(\tau) \rangle \, \langle Q_1^{e_1}(\tau) \rangle \, \langle Q_2^{a_2}(\tau) \rangle$$

$$- T_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha)}(t') \left(\sum_{\rho} \int T_{\boldsymbol{k}}^{*(\rho)}(t') dt' \right) \left(T^{a_1} T^{e_2} T^{a_1'} \mathcal{N}_{\boldsymbol{k}'}^{(\rho,\alpha')} \right)^{aa'} \langle Q_1^{a_1'}(\tau) \rangle \, \langle Q_2^{e_2}(\tau) \rangle \langle Q_1^{a_1}(\tau) \rangle +$$

(к.с.).

Далее была предложена двойная декомпозиция плотности числа плазмонов $\mathcal{N}_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha,\alpha')aa'}$. Первая из них связана с индексами (α, α'), т.е. с двухчастичной матрицей. Здесь мы имеем

$$\mathcal{N}_{\boldsymbol{k}}^{(\alpha,\alpha')aa'}$$

Вторая – определяется разложением матричных функций $\mathcal{N}_{\boldsymbol{k}}^{aa'}$ и $\mathcal{W}_{\boldsymbol{k}}^{aa'}$ по цветовым генераторам в присоединенном представлении: $\mathcal{N}_{\boldsymbol{k}}^{aa'} = \delta^{aa'} N_{\boldsymbol{k}}^{(1)} + (T^{c_1})^{aa'} \langle Q_1^{c_1} \rangle \, N_{\boldsymbol{k}}^{(2)}$,

$$\mathcal{W}_{\boldsymbol{k}}^{aa'} = \delta^{aa'} W_{\boldsymbol{k}}^{(1)} + (T^{c_2})^{aa'} \langle Q_2^{c_2} \rangle \, W_{\boldsymbol{k}}^{(2)}, \qquad (4)$$

где $N_{\boldsymbol{k}}^{(i)}$ и $W_{\boldsymbol{k}}^{(i)}$, $i = 1, 2,$ – обычные числовые функции переменных τ и $\boldsymbol{k}$.

В частном случае цветовой группы $SU(3_c)$ были определены соответствующие кинетические уравнения для скалярных бесцветной $N_{\boldsymbol{k}}^{(1)}$ и цветной $N_{\boldsymbol{k}}^{(2)}$ частей плотности числа плазмонов:

$$\frac{\partial N_{\boldsymbol{k}}^{(1)}}{\partial \tau} = \frac{(2\pi)^3}{16|\Delta \boldsymbol{v}|} \sum_{\rho} \int d\boldsymbol{q} \left| T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{(\rho)} \right|^2 (2\pi) \delta(\omega_{\boldsymbol{k}}^{l} - \boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{v}_{\rho} - (-1)^{\rho} \Delta \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{q}) \times$$

$$\times \left\{ \frac{3}{2} \mathrm{q}_{12}^2 + \frac{3}{4} \mathrm{q}_1 \mathrm{q}_2 + \frac{9}{4} \mathrm{q}_1 \mathrm{q}_{12} - \Lambda^2 \right\} N_{\boldsymbol{k}}^{(2)}$$

$$+ \left(\text{вклад с } W_{\boldsymbol{k}}^{(2)} \right),$$

$$\frac{\partial N_{\boldsymbol{k}}^{(2)}}{\partial \tau} + \frac{1}{2} N_{\boldsymbol{k}}^{(2)} \frac{\partial \ln \mathrm{q}_1}{\partial \tau} = \frac{(2\pi)^3}{6|\Delta \boldsymbol{v}|} \frac{1}{\mathrm{q}_1} \sum_{\rho} \int d\boldsymbol{q} \left| T_{\boldsymbol{k},\boldsymbol{q}}^{(\rho)} \right|^2 (2\pi) \delta(\omega_{\boldsymbol{k}}^{l} - \boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{v}_{\rho} - (-1)^{\rho} \Delta \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{q})$$

$$\times \left\{ \frac{3}{2} \mathrm{q}_{12}^2 + \frac{3}{4} \mathrm{q}_1 \mathrm{q}_2 + \frac{9}{4} \mathrm{q}_1 \mathrm{q}_{12} - \Lambda^2 \right\} N_{\boldsymbol{k}}^{(1)}$$

$$+ \left(\text{вклад с } W_{\boldsymbol{k}}^{(1)} \right).$$

Здесь $\Delta \boldsymbol{v} \equiv \boldsymbol{v}_1 - \boldsymbol{v}_2$, а также введены обозначения для бесцветных квадратичных комбинаций усредненных зарядов $\mathrm{q}_1 \equiv \langle Q_1^e \rangle \langle Q_1^e \rangle$, $\mathrm{q}_2 \equiv \langle Q_2^e \rangle \langle Q_2^e \rangle$, $\mathrm{q}_{12} \equiv \langle Q_1^e \rangle \langle Q_2^e \rangle$ и $\Lambda^2 = \Lambda^e \Lambda^e$, где

$$\Lambda^e \equiv f^{eb_1b_2} \langle Q_1^{b_1} \rangle \langle Q_2^{b_2} \rangle.$$

Полностью аналогичные рассуждения приводят нас к двум другим кинетическим уравнениям для скалярных бесцветной и цветной частей плотности числа плазмонов $W_{\boldsymbol{k}}^{(1)}$ и $W_{\boldsymbol{k}}^{(2)}$ в представлении (4). Был рассмотрен вывод уравнений движения для средних значений цветных зарядов Q_1^e и Q_2^e. На основе этих уравнений определены уравнения, определяющие временную зависимость бесцветных комбинаций второго и четвертого порядков от средних значений данных зарядов. Это позволило получить полностью самосогласованную систему в описании процесса тормозного излучения цветных плазмонов в кварк-глюонной плазме.

1. Марков Ю.А., Маркова М.А., Марков Н.Ю., Гитман Д.М. Гамильтонов формализм для бозе-возбуждений в плазме с неабелевым типом взаимодействия // 1. 1. Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 157. – Вып. 2. – С. 327-341.
2. Markov Yu.A., Markova M.A., Markov N.Yu. Hamiltonian formalism for Bose excitations in a plasma with a non-Abelian interaction I // Nuclear Physics A. – 2024. – 1048. – P. 122903(38).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГОКОМПАНИЙ В НЕСКОЛЬКИХ РЕГИОНАХ*

И. М. Минарченко, О. В. Хамисов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
minar@isem.irk.ru, khamisov@isem.irk.ru

В докладе анализируется равновесие по Нэшу в модели EMELIE [1-2], описывающей поведение нескольких энергокомпаний. Используемые обозначения: G – множество энергокомпаний, R – множество регионов, L – множество временных периодов, I – множество типов генерации, x_{gril} – генерация электроэнергии компанией $g \in G$ в регионе $r \in R$ типом генерации $i \in I$ в период $l \in L$, y_{grr^*l} – объём электроэнергии, отправляемый компанией g из региона r в регион r^* в период l, c_{gri} – удельные издержки генерации типом i, принадлежащим компании g в регионе r, p_{gl} – цена на электроэнергию в регионе r в период l.

Поведение компании g определяется максимизацией прибыли Π_g,

$$\Pi_g = \sum_{r^* \in R} \sum_{l \in L} p_{r^*l} h_l s_{gr^*l} - \sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} c_{grl} x_{gril} \to \max, \quad (1)$$

$$s_{gr^*l} = \sum_{r \in R} (1 - \delta_{rr^*}) y_{grr^*l}, \quad r^* \in R, l \in L, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{gril} = \sum_{r^* \in R} y_{grr^*l}, \quad r \in R, l \in L, \quad (3)$$

$$0 \le x_{gril} \le \bar{x}_{gri}, \quad r \in R, i \in I, l \in L \quad (4)$$

, где h_l – количество часов в периоде $l \in L$, δ_{rr^*} – удельные потери при передаче электроэнергии из региона r в регион r^*, $\bar{x}_{gri}$ – установленная мощность станции i, принадлежащей компании g в регионе r.

Цена p_{r^*l} определяется обратной функцией спроса с постоянной эластичностью ε_{r^*l}:

$$p_{r^*l} = p_{rl}^0 \left(\frac{S_{r^*l}}{d_{r^*l}^0} \right)^{\varepsilon_{r^*l}}, \quad (5)$$

$$S_{r^*l} = \sum_{g \in G} s_{gr^*l}. \quad (6)$$

В итоге получаем обобщённую задачу равновесного программирования (1)-(6). Предлагается методика поиска равновесия по Нэшу, основанная на понятии функции оптимального значения [3] и экстрапроксимального поиска [4].

1. Lise W., Linderhof V. Electricity market liberalization in Europe – Who's got the power? // Internally review report (R-04/03), Institute for Environmental Studies, Free University, Amsterdam, The Netherlands, 2004.
2. Lise W., Linderhof V., Kuik O., Kemfert C., Ostling R., Heinzow T. A game theoretical model of Northwestern European electricity market – market power and environment // Energy Policy. 2006. Vol. 34. P. 2123-2136.
3. Хамисов О. В. Оптимизация функции оптимального значения в задачах выпуклого параметрического программирования // Труды ИММ УрО РАН. 2023. Т. 29. №2. С. 249-260.
4. Антипин А. С. Экстрапроксимальный метод решения равновесных и игровых задач со связанными переменными // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2005. Т. 45. С. 2102-2111.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-41-03004.

РАЗРАБОТКА СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЖИВУЧЕСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ*

М. А. Михеев[1], А. В. Еделев[1,2], О. Ю. Башарина[2,3], Д. Н. Карамов[2,4]
[1] Институт систем энергетики СО РАН
[2] Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН
[3]Уральский государственный экономический университет
[4]Иркутский национальный исследовательский технический университет
mihaalmiheev@gmail.ru, flower@isem.irk.ru, basharinaolga@mail.ru, dmitriy.karamov@mail.ru

Работа посвящена разработке приложения оптимизации живучести энергетических комплексов, обеспечивающего выбор их инвариантных системных конфигураций относительно большого числа сценариев крупных возмущений. В рамках предыдущих исследований [1] был разработан комплексный подход к структурно-параметрической оптимизации энергетических комплексов с учётом воздействия крупных возмущений (рис. 1). Многоуровневая схема оптимизации позволяет лицам, принимающим решения, за приемлемое время получить целый спектр альтернативных перспективных системных конфигураций, обеспечивающих устойчивое и бесперебойное энергоснабжение потребителей в заданных экстремальных условиях.

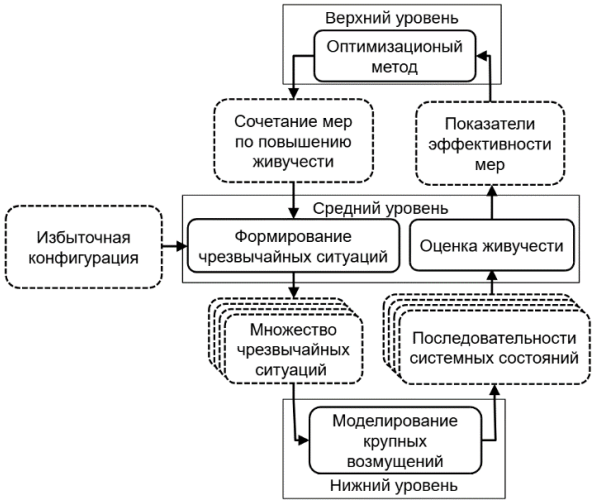


Рисунок 1. Схема оптимизации живучести энергетических комплексов

В данной работе описывается прототип сервис-ориентированного приложения, реализующего схему на рис. 1 на основе IMDG-технологий и контейнеризации среды моделирования энергетических комплексов ETHOS.FINE. Разрабатываемое приложение отличается от ранее созданных [1] тем, что позволяет глубже обосновывать выбор инвариантных системных конфигураций за счёт расчёта на порядок большего числа сценариев крупных возмущений.

1. Edeleva O., Edelev A., Voskoboinikov M., Feoktistov A. Scientific Workflow-Based Synthesis of Optimal Microgrid Configurations // Energies. 2024. Vol. 17, № 23. P. 6138. DOI: 10.3390/en17236138.

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

ГИБРИДНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСХОДОВ МЕДИЦИНСКИХ ПРЕПАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

А. А. Мурин[1], С. М. Пещерова[1], Н. Ю. Алексеева[2]
ФБГОУ ВО «Иркутский государственный университет»
«Иркутский государственный медицинский университет» Минздрава России,
Факультетсткие клиники
murzint@gmail.com

Введение. Оптимизация закупок и планирования расходов на лекарственные препараты является одной из ключевых задач управления в медицинских учреждениях. Медицинские информационные системы (МИС) аккумулируют детальные записи о назначениях, выполненных процедурах и списаниях, однако их аналитический функционал редко ориентирован на долгосрочное прогнозирование и предупреждение дефицитов. Необходимость специализированных прогнозных подходов, способных учитывать как нестационарность спроса, так и структурные разрывы в данных, подчеркивается в работе [1], где предложена оптимизация методов прогнозирования для закупок контролируемых препаратов, а акцент сделан на снижение совокупной стоимости владения запасами при соблюдении нормативных ограничений и управлении рисками поставок. Показано, что корректная настройка моделей непосредственно влияет на бюджетные показатели медицинской организации. В работе [2] исследованы требования к моделям, работающим с изменениями режимов в госпитальном спросе на препараты и продемонстрирована важность явного моделирования структурных сдвигов при построении краткосрочных и среднесрочных прогнозов. Также подчеркивается целесообразность интеграции методов анализа больших данных и интеллектуальных алгоритмов в медицинские экосистемы, где источники разнородны, а сигналы шумны [3]. Обзоры систематизируют роль методов искусственного интеллекта в клинических и управленческих задачах здравоохранения, подчёркивая, что экономическая эффективность тесно связана с качеством предиктивной аналитики [4, 5]. На этом фоне в представленной работе решается задача прогнозирования списаний лекарственных препаратов на основе реальных данных МИС «Ариадна» клиники медицинского университета. Новизна заключается в практико-ориентированной гибридной архитектуре: объединении последовательностного канала для временных зависимостей и канала категориальных признаков с механизмом внимания, а также в прикладной постановке «препарат–отделение–месяц» с формированием обогащённого датасета из разрозненных Excel-выгрузок. Для используемого набора данных и для интеграции с МИС «Ариадна» не удалось обнаружить ранее опубликованных решений, обеспечивающих сопоставимую глубину предобработки, валидации и качества краткосрочного прогноза. Цель исследования - разработать, обучить и оценить гибридную нейросетевую модель прогнозирования месячных списаний препаратов, а также проверить её устойчивость на перекрёстной валидации по временным блокам и готовность к внедрению в клинико-административный цикл (ФГБОУ ВО "Иркутский государственный медицинский университет" минздрава России Факультетсткие клиники). Методы включают инженерную подготовку временных рядов, генерацию лагов и скользящих агрегатов, нормализацию категорий, построение гибридной архитектуры на основе двунаправленной LSTM, свёрточного слоя и механизма внимания, а также оценку по метрикам WAPE и MAE с процедурой TimeSeriesSplit.

Материалы и методы исследования. Использовались выгрузки из МИС «Ариадна» за 2021-2025 гг. в формате Excel по двум основным источникам: поставки (цена и объём поступления препарата по отделениям) и списания (цена списания, назначенные и выполненные назначения, единицы измерения, сведения о госпитализации). Выполнено сопоставление номенклатуры, унификация отделений, очистка и нормализация единиц измерения, формирование временных меток «месяц–год», построение полных комбинаций «отделение–месяц–препарат» для устранения пропусков, агрегирование месячных показателей, генерация лагов (1, 3, 6 месяцев) и скользящих агрегатов (математическое ожидание и стандартное отклонение на окнах 3 и 6 месяцев), кодирование категориальных признаков. Итоговый датасет включает десятки тысяч записей и два десятка признаков, и он отражает не только временную динамику, но и контекст использования препаратов по отделениям.

Сравнивались классические подходы (ARIMA/Prophet), бустинговые модели (LightGBM/CatBoost) с лаговыми признаками и гибридная нейронная сеть. Финально выбрана архитектура с двумя входными каналами: последовательностный канал для временных признаков реализован двунаправленной LSTM (256 нейронов) и Conv1D для локальных мотивов. Канал категориальных признаков реализован полносвязными слоями с L2-регуляризацией; объединённое представление подаётся в полносвязный классификатор-регрессор с Dropout. Для устойчивости применены BatchNormalization, ранняя остановка и регуляризация. Кросс-валидация организована как TimeSeriesSplit на 5 фолдов. Базовая метрика WAPE (добавочно оценивается MAE). Визуализация динамики обучения и качества прогноза выполнялась средствами Python/Plotly/Matplotlib в рамках разработанного интерфейса (Streamlit).

Результаты исследования и их обсуждение. Определена задача прогнозирования месячных списаний препаратов по схеме «препарат–отделение–месяц», где целевая переменная представляет собой объём списаний в натуральных единицах. Выполнено логарифмирование цели и клиппинг по перцентилям для снижения влияния экстремальных выбросов и утверждены правила обратного преобразования. Получено корректное распределение ошибки, пригодное для оптимизации по WAPE/MAE. Сформирован календарный базис (месяц, квартал, год) и циклическое кодирование сезонности; созданы лаги 1, 3, 6 месяцев, скользящие средние и дисперсии, добавлены долевые и дефицитные индикаторы по отделению. Проведена унификация наименований отделений и единиц измерения, верификация «наименование–единица» для предотвращения артефактов. Обеспечена полнота временных сеток для исключения смещения оценок. Реализована двуканальная архитектура: BiLSTM+Conv1D+attention для временной последовательности и полносвязный канал для категорий. Подбор гиперпараметров ыполнен методом RandomSearch (размерность скрытых слоёв, коэффициенты регуляризации, скорость обучения, доля Dropout). Выбрана модель с BiLSTM(256), Dropout 0,4 и шагом обучения 1e-3; обучение 300 эпох с ранней остановкой по валидационной WAPE.

Применён TimeSeriesSplit на 5 фолдов, зафиксирована устойчивость кривых обучения и отсутствие выраженного разрыва между обучением и валидацией. На графике динамики WAPE для каждого фолда видно быстрое убывание ошибки на первых итерациях и последующее насыщение на малых значениях (Рис. 1а).

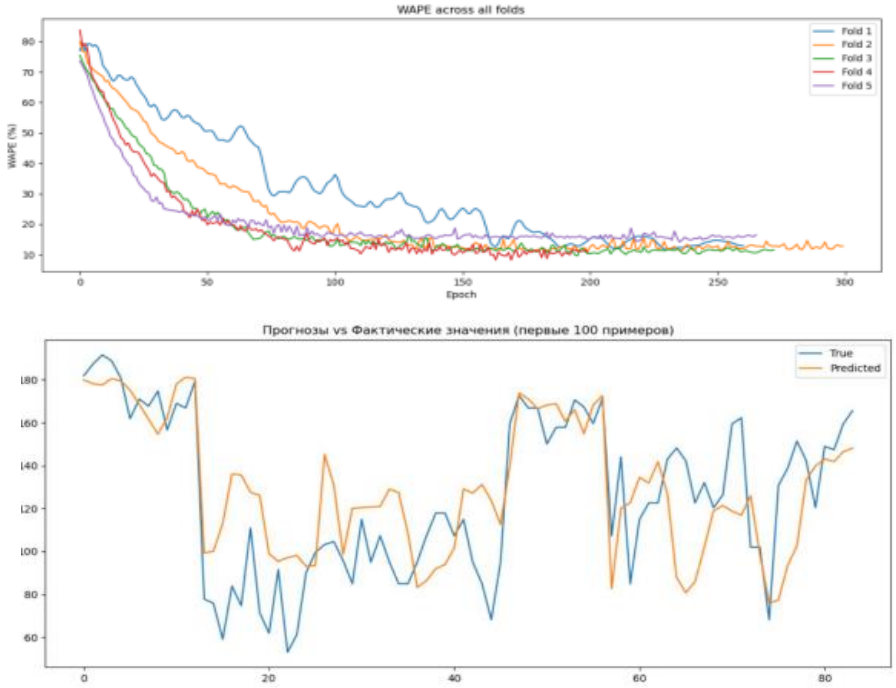


Рисунок 1. а - показатель WAPE при обучении для каждого фолда; б - Сопоставление прогноза и фактических значений на первых ста примерах тестовой выборки

На валидационной части данных построены профили «факт–прогноз» для первых ста примеров. На Рис. 1б показано согласование пиков и спадов, допускаемые отклонения связаны с эпизодическими аномалиями спроса, не полностью описанными лаговыми характеристиками. Валидированы диапазоны ошибок, подтверждена адекватность модели для оперативного планирования.

Выводы. Разработана и обоснована гибридная архитектура прогнозирования месячных списаний лекарственных препаратов, сочетающая последовательностный канал на основе двунаправленной LSTM и свёрточного извлечения локальных мотивов с каналом категориальных признаков и механизмом внимания. Создан прототип пользовательского интерфейса с интерактивной визуализацией и фильтрами; подтверждена технологическая готовность к внедрению в операционные контуры медицинской организации. Сопоставление с международными публикациями показывает, что в представленном прикладном контексте и для набора данных МИС «Ариадна» совокупность инженерии данных, гибридной архитектуры и операционного прототипа является оригинальным решением, не имеющим прямых аналогов в открытой литературе на русском и английском языках с сопоставимой глубиной интеграции.
Практический эффект выражается в повышении точности и стабильности краткосрочного прогноза, снижении риска дефицитов и перерасхода, а также в возможности обоснованного бюджетирования на уровне отделений и номенклатуры препаратов.

1. Almaktoom A. T., Yusuf N. Optimizing forecasting techniques for cost-effective procurement of controlled medications in Saudi Arabia’s healthcare system. International Journal of Pharmaceutical and Healthcare Marketing, 2025. DOI:10.1108/IJPHM-12-2024-0143.
2. Xu T., Bos H., Byon E., Lavieri M. S., Renius K., Sweet B. V. Forecasting hospital drug demand for demand patterns with changepoints. IISE Transactions on Healthcare Systems Engineering, 2025, 15(3), 269–286. DOI:10.1080/24725579.2025.2538009.

3. Khang A., Triwiyanto, Abdullayev V., Ragimova N. A., Ali Sardarov Y., Bali Guliyev M., Mammadov M. M., Hafiz K. Using big data to solve problems in the field of medicine. In: Computer vision and AI-integrated IoT technologies in the medical ecosystem. CRC Press, 2024, pp. 407–418. DOI:10.1201/9781003429609-23.
4. Zeb S., Abbasi N., et al. AI in healthcare: revolutionizing diagnosis and therapy. International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts, 2024, 3(3):118–128. DOI:10.47709/ijmdsa.v3i3.4546.
5. Mehedy M. T. J., Jalil M. S., Saeed M., Abdullah Al Mamun, Esrat Z. Snigdha, Md Nadil Khan, Nahid Khan, Md Mohaiminul Hasan. Big Data and Machine Learning in Healthcare: A Business Intelligence Approach for Cost Optimization and Service Improvement. The American Journal of Medical Sciences and Pharmaceutical Research, 2025, 7:115–135. DOI:10.37547/tajmspr/Volume07Issue03-14.

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ DEVOPS ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НАУЧНЫМ ПРИЛОЖЕНИЯМ В ГЕТЕРОГЕННОЙ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ*

Е. П. Николаев
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
Иркутский государственный университет путей сообщения
zhenya_nikolaev_1995@list.ru

Введение. Научная проблема поддержки DevOps применительно к научным приложениям в гетерогенной распределённой вычислительной среде (ГРВС) заключается не только в существенных накладных расходах на ручное развёртывание программного обеспечения (ПО), но и в отсутствии механизмов структурированного управления многоэтапными процессами распределённых вычислений и их непрерывного мониторинга на вычислительном кластере [1].

Традиционные подходы, основанные на использовании монолитных программ (например, скриптов), не обеспечивают достаточной гибкости для адаптации к специфике научных рабочих процессов и сложной топологии ГРВС. Ключевыми аспектами, влияющими на сложность решения данной проблемы, являются:

– различия в аппаратно-программном окружении узлов ГРВС;

– многоэтапность развёртывания (конфигурирования узлов, установки системы контейнеризации containerd [2], инициализации системы оркестровки контейнеризированных приложений Kubernetes [3], настройки сетевых ресурсов с помощью стандартного интерфейса Container Network Interface [4], развёртывания системы управления заданиями (СУПЗ) HTCondor [5]);

– необходимость обеспечения отказоустойчивости как на этапе развёртывания ПО, так и в процессе выполнения экспериментов по решению научных и прикладных задач.

Методы и средства. В работе предложена многоагентная архитектура системы поддержки DevOps применительно к научным приложениям в ГРВС. Основные этапы развёртывания и выполнения приложения представлены на рис.1. Система поддержки DevOps включает следующих агентов:

– координатор-агент управляет последовательностью этапов DevOps применительно к научным приложениям в ГРВС и обработкой ошибок;

– исполнительные агенты отвечают за выполнение отдельных Ansible-плейбуков (system-prep, containerd, k8s-install и др.) [6];

– агент мониторинга, размещённый на узле центрального менеджера СУПЗ HTCondor, обеспечивает непрерывную проверку состояния вычислительного кластера через её встроенные утилиты kubectl и condor_status.

Такой подход позволяет декомпозировать сложный процесс развёртывания научного приложения на независимые, повторяемые и наблюдаемые этапы, а также

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» (рег. № 121032400051-9) и грант № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

обеспечить реактивное управление в режиме реального времени исполнения. Система поддержки DevOps интегрирована с инструментальным комплексом FDE-SWFs [6].

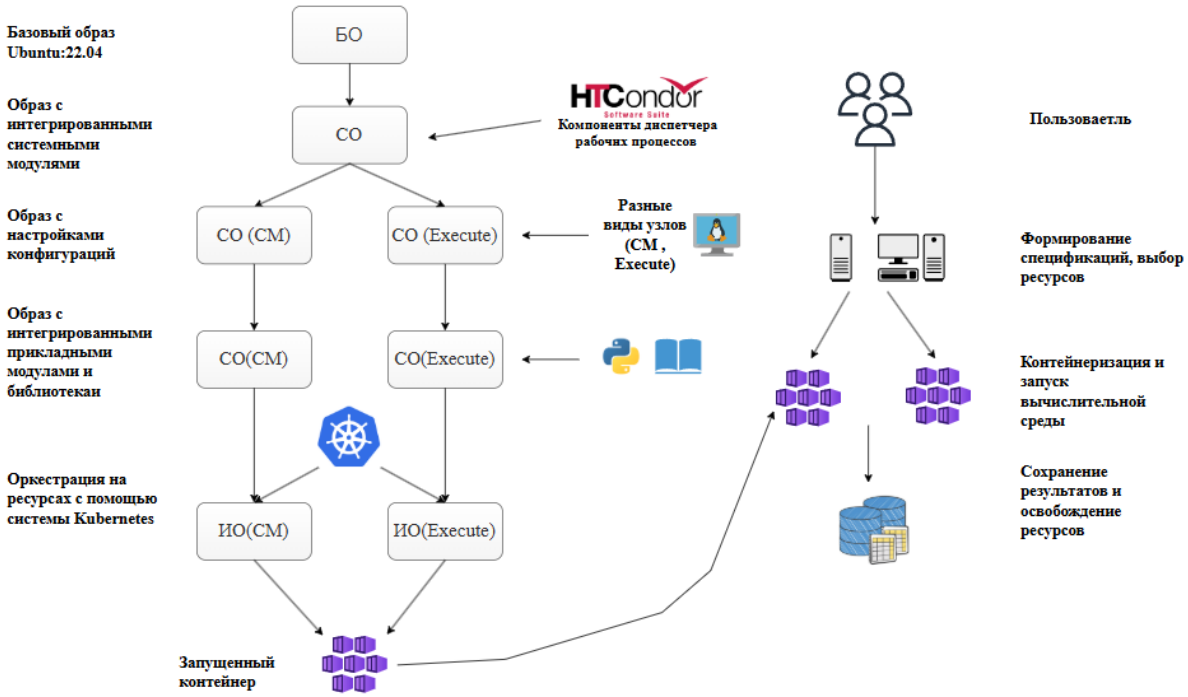


Рисунок 1. Основные этапы развёртывания и выполнения приложения

Практическое применение. Разработанная система апробирована в процессе подготовки и проведения экспериментов по решению задачи глобального анализа чувствительности модели энергетического комплекса [7]. Автоматизация этапов DevOps позволила сократить временные затраты более чем в два с половиной раза в сравнении с ручным режимом.

Заключение. Преимущества предложенного подхода к поддержке DevOps применительно к научным приложениям в ГРВС заключаются в обеспечении воспроизводимости экспериментов, повышении надёжности развёртывания ПО и упрощении диагностики сбоев в его процессах за счёт структурированного логирования информации.

1. Костромин Р. Подход к развертыванию программного обеспечения вычислительного кластера по облачной модели // Материалы VI Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2024). 1-5 июля 2024 г., г. Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024. С. 135–140.
1. containerd. URL: https://containerd.io/.
2. Kubernetes. URL: https://kubernetes.io/.
3. The Container Network Interface. URL: https://www.cni.dev/.
4. HTCondor. URL: https://htcondor.com/index.html.
5. Ansible. URL: https://www.redhat.com/en/ansible-collaborative.
6. Воскобойников М.Л., Феоктистов А.Г., Черных А.Н. Разработка и применение сервис-ориентированных научных приложений в инструментальном комплексе FDE-SWFs // Труды ИСП РАН. 2024. Т. 36. № 6. С. 195-214.
7. Feoktistov A., Edelev A., Tchernykh A., Gorsky S., Basharina O., Fereferov E. An Approach to Implementing High-Performance Computing for Problem Solving in Workflow-based Energy Infrastructure Resilience Studies // Computation. 2023. Vol. 11, № 12. P. 243.

О РАЦИОНАЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ СПОСОБОВ ПРЯМОГО И НЕЯВНОГО УЧИТЫВАНИЯ НЕКОТОРЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ РАВЕНСТВ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

М. А. Новиков
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
nma@icc.ru

В докладе обсуждаются две или более квадратичных форм, из которых одна принимает конечное фиксированное значение. Такие задачи часто возникают при исследовании устойчивости некоторых стационарных движений вторым методом Ляпунова [1]. Знакоопределенные функции Ляпунова строятся способом Четаева [2] связкой из первых интегралов возмущенного движения. Особый интерес представляют первые интегралы, как общие, так и частные, принимающие значения конечной ограниченной величины.

Рассмотрены простейшие примеры, в том числе ранее изученные, где для задач устойчивости демонстрируются явные или неявные исключения одной квадратичной формы: исключенеие одной переменной, или использование связки форм с неопределенными множителями Лагранжа. Вместе с тем показано преимущество предварительного проведения исключения одной из переменных, которой является отклонение от невозмущенного движения:

В зависимости от вида задач целесообразно применение прямого или неявного исключения одного или нескольких алгебраических равенств. Более удачным будет применение обоих способов исключения алгебраических равенств.

1. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. Т.2 – М.-Л: Изд-во АН СССР, 1956. С.7-263.
2. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. Работы по аналитической механике. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. 535 с.

ЗАДАЧА КОНКУРЕНЦИИ РЕГИОНОВ ПРИ ПОСТАВКАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ*

А. В. Орлов, Т. В. Груздева
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
anor@icc.ru, gruzdeva@icc.ru

В работе исследуется равновесная математическая модель поставок электроэнергии между тремя регионами (странами), базирующаяся на известной модели EMELIE [1]. Пусть R – множество стран (Россия, Монголия, Китай), $r \in R = \{1,2,3\}$ и заданы 2 периода потребления электроэнергии (пиковый и базовый), $t \in T = \{1,2\}$, h_t – количество часов в периоде t. Кроме того: c_{ri} – удельные издержки на производство электроэнергии генерирующей станцией типа i (например, ГЭС, ТЭЦ) в регионе r; δ_{rr^*} – удельные потери при транспортировке (перетоке) электроэнергии из региона r в регион r^*; x_{rit} – объем производства электроэнергии в регионе r станциями типа i в период t; y_{rr^*t} – объем электроэнергии, отправляемый из региона r в регион r^*в период t; $\overline{x}_{ri}$ – установленная мощность станций типа i в регионе r.

Производители в каждом регионе r^* стремятся максимизировать свою прибыль, продавая электроэнергию по цене p_{rt}, которая складывается в регионе продажи, в том числе и в своем регионе (полагаем $\delta_{r^*r^*} = 0$):

$$\Phi_{r^*}(x) = \sum_{t\in T} h_t \sum_{r\in R} p_{rt}(y)\,(1-\delta_{rr^*})y_{rr^*t} - \sum_{t\in T} h_t \sum_{i\in I} c_{r^*i}x_{r^*it} \uparrow \max_{x,y}, \qquad (PR)$$

, где

$p_{rt}(y) = p^0_{rt}\left[\frac{\sum_{k\in R}(1-\delta_{kr})y_{krt}}{d^0_{rt}}\right]^{\varepsilon_{rt}}$, p^0_{rt}, d^0_{rt} – эталонные цена и спрос, а ε_{rt} – постоянная эластичность спроса в регионе r в период t. Дополнительно накладываются естественные ограничения на генерирующие мощности:

$$0 \le x_{rit} \le \overline{x}_{ri} \qquad r \in R, i \in I, t \in T$$

и ограничения баланса:

$$\sum_{i\in I} x_{rit} = \sum_{r^*\in R} y_{rr^*t,} \qquad r \in R, t \in T.$$

В результате получаем равновесную задачу трех игроков с ограничениями, где требуется отыскать ситуацию равновесия по Нэшу. С этой целью, прежде всего, путем введения штрафных множителей задача (PR) сводится к равновесной задаче без ограничений, и устанавливаются границы изменения каждой переменной для определения конечного набора стратегий игроков. Вычисляя значения целевых функций игроков во всех возможных ситуациях, строим соответствующую конечную трехмерную бескоалиционную игру [2]. Применяя теорему редукции Милса [3] к построенной игре, в итоге получаем эквивалентную ей невыпуклую задачу оптимизации, которую предлагается решать с помощью Теории глобального поиска А.С. Стрекаловского.

1. Lise W., Linderhof V. Electricity market liberalization in Europe – Who's got the power? // Internally review report (R-04/03), Institute for Environmental Studies, Free University, Amsterdam, The Netherlands, 2004.
2. Орлов А.В. Треугольники конфликтов и гексаматричные игры // Математическая Теория Игр и ее Приложения. 2024. Т.16, в.4. С. 69–94.
3. Mills H. Equilibrium points in finite games // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1960. Vol. 8, No. 2. P.397–402.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-41-03004.

ТЕСТИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО И ГЛОБАЛЬНОГО ПОИСКОВ В ДВУХУРОВНЕВЫХ ЗАДАЧАХ С РАВНОВЕСИЕМ НА НИЖНЕМ УРОВНЕ

А. В. Орлов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
anor@icc.ru

В работе исследуется следующая задача математической оптимизации с d.c. целевой функцией и выпуклым допустимым множеством [1,2]:

$$\Phi_\sigma(x,y,z,\alpha,\beta) := f_0(x,y,z) + \sigma\, W(x,y,z,\alpha,\beta) \downarrow \min_{\theta:=(x,y,z,\alpha,\beta)}, \quad (x,y,z) \in S, \qquad (DC(\sigma))$$

где $\sigma > 0$ – штрафной параметр, а функция $W(\cdot)$ имеет вид $(N = n_1 + n_2 + 1)$:

$$W(x,y,z,\alpha,\beta) := \max\{0, f_1(x,z,\alpha), \dots, f_{n_1}(x,z,\alpha), f_{n_1+1}(x,y,\beta), \dots, f_{n_1+n_2}(x,y,\beta)\} + |f_N(y,z,\alpha,\beta)|,$$

$$f_i(x,z,\alpha) := g_i(x,z,\alpha) - h_i(x,z) = \langle b_1, x\rangle\langle (B_1)_i, z\rangle - \alpha \le 0, \quad i \in I = \{1,\dots,n_1\},$$

$$f_j(\cdot) := g_j(x,y,\beta) - h_j(x,y) = \langle b_2, x\rangle\langle (B_2)_j, y\rangle - \beta \le 0,\ j \in J = \{n_1+1,\dots,n_1+n_2\},$$

$$f_N(y,z,\alpha,\beta) := g_N(y,z,\alpha,\beta) - h_N(y,z) = \langle y, (B_1+B_2)z\rangle - \alpha - \beta = 0.$$

Исследуемая задача с точки зрения поиска глобальных решений является эквивалентной двухуровневой задаче (ДУЗ) с равновесием на нижнем уровне [2]:

$$\left.\begin{aligned} -f_0(x,y,z) = \langle x, Cx\rangle + \langle c, x\rangle + \langle y, D_1 y\rangle + \langle d_1, y\rangle + \langle z, D_2 z\rangle + \langle d_2, z\rangle \uparrow \max_{x,y,z}, \\ x \in X,\ (y,z) \in NE(\Gamma B(x)), \end{aligned}\right\} \qquad (BP_{\Gamma B})$$

где $X = \{x \in R^m \mid Ax \le a,\ x \ge 0,\ \langle b_1, x\rangle + \langle b_2, x\rangle = 1\}$, $NE(\Gamma B(x))$ – множество ситуаций равновесия по Нэшу в следующей ненормализованной биматричной игре:

$$\left.\begin{aligned} \langle y, B_1 z\rangle \uparrow \max_y, \quad y \in Y(x) = \{y \mid y \ge 0,\ \langle e_{n_1}, y\rangle = \langle b_1, x\rangle\}, \\ \langle y, B_2 z\rangle \uparrow \max_z, \quad z \in Z(x) = \{z \mid z \ge 0,\ \langle e_{n_2}, z\rangle = \langle b_2, x\rangle\}; \end{aligned}\right\} \qquad (\Gamma B(x))$$

$c,\ b_1,\ b_2 \in R^m$; $y,\ d_1 \in R^{n_1}$; $z,\ d_2 \in R^{n_2}$; $a \in R^{m_1}$; $b_1 > 0$,, $b_2 > 0$; A, B_1, B_2, C, D_1, D_2 – матрицы соответствующего размера. При этом $C = C^T$, $D_1 = D_1^T$, $D_2 = D_2^T$ – неположительно определены, так что целевая функция верхнего уровня является вогнутой.

Специальный штрафной метод локального поиска (СШМЛП) в задаче $(DC(\sigma))$ базируется, в частности, на решении впомогательных выпуклых линеаризованных в точке $\eta \in R^{m+n_1+n_2+2}$ задач следующего вида (подробнее см. [1,2]):

$$\Psi_{\sigma\eta}(\theta) := G_\sigma(\theta) - \langle \nabla H_\sigma(\eta), \theta\rangle \downarrow \min_\theta, \quad \theta \in S', \qquad (P_\sigma L(\eta))$$

, где $G_\sigma(\cdot)$ и $H_\sigma(\cdot)$ – компоненты d.c. разложения целевой функции задачи $(DC(\sigma))$:

$$G_\sigma(\theta) := f_0(x,y,z) + \sigma \max\{\sum_{k\in I} h_k(x,z) + \sum_{k\in J} h_k(x,y);$$

$$[g_l(\cdot) + \sum_{k\in I\cup J}^{k\neq l} h_k(\cdot)], l \in I \cup J\} + 2\sigma \max\{g_N(y,z,\alpha,\beta); h_N(y,z)\},$$

$$H_\sigma(\theta) := \sigma[\sum_{i\in I} h_i(x,z) + \sum_{j\in J} h_j(x,y) + g_N(y,z,\alpha,\beta) + h_N(y,z)],$$

$$S' = \{\theta \overset{\Delta}{=} (x,y,z,\alpha,\beta) \in R^{m+n_1+n_2+2} \mid (x,y,z) \in S\}.$$

Кроме того, необходимо представить и саму штрафную функцию $W(\theta)$ в виде разности двух выпуклых, так что $W(\theta) = G_W(\theta) - H_W(\theta)$, где $H_W(\theta) = 1/\sigma[H_\sigma(\theta)]$, $G_W(\theta) = 1/\sigma[G_\sigma(\theta) - f_0(x,y,z)]$, решая на шагах метода соответствующую линеаризованную задачу:

$$\Psi_{W\eta}(\theta) := G_W(\theta) - \langle \nabla H_W(\eta), \theta\rangle \downarrow \min_\theta, \quad \theta \in S', \qquad (P_W L(\eta))$$

Нетрудно заметить, что задачи $(P_\sigma L(\eta))$ и $(P_W L(\eta))$ являются негладкими. Их решение осуществляется с помощью применения известной леммы, позволяющей редуцировать негладкую задачу к задаче с дополнительными переменными и ограничениями, где все функции дифференцируемы (см., например, [3]).

СШМЛП является одним из основных модулей метода решения исходной ДУЗ $(BP_{\Gamma B})$ с биматричной игрой на нижнем уровне (Схемы глобального поиска, СГП) на основе Теории глобального поиска А. С. Стрекаловского (подробнее см. в [1]), которая позволяет строить эффективные численные алгоритмы для решения задач невыпуклой оптимизациии и исследования операций, в том числе задач с двухуровневой структурой [4]. При этом особенностью СГП является то, что основная работа по увеличению параметра штрафа происходит внутри метода локального поиска [1].

Для экспериментальной проверки работоспособности и эффективности новых методов решения задач оптимизации необходимо построение тестовых задач различной сложности и размерности. При этом желательно обладать информацией о структуре и свойствах тестовых задач, чтобы сделать вывод о границах применимости исследуемых методов [5]. Для первого этапа тестирования разработанных методов был сконструирован пример небольшой размерности со следующими данными: $m = 1$, $n_1 = 3$, $n_2 = 3$. $C = D_1 = D_2 = 0$, $c = 5$; $d_1 = (-1,-2,-3)^T$, $d_2 = (-2,-3,-4)^T$; $A = 4$, $a = 8$, $b_1 = 0,2$; $b_2 = 0,3$; $B_1 = \begin{pmatrix} -10 & 0 & 0 \\ 0 & -10 & 0 \\ 0 & 0 & -10 \end{pmatrix}$; $B_2 = \begin{pmatrix} 9 & -5 & -9 \\ -1 & 5 & -9 \\ -1 & -5 & 1 \end{pmatrix}$. Здесь следует обратить особое внимание на построение на нижнем уровне ненормализованной биматричной игры, которая должна иметь достаточно большое количество решений (точек равновесия по Нэшу) для обеспечения широкого выбора допустимых точек всей двухуровневой задачи с равновесием. В данном случае это достигается с помощью конструирования игры $\Gamma(B_1, B_2)$ с помощью известных результатов решения игры «Усовершенствованные прятки» (см. [6]). Кроме того, важным являются построение стартовой точки и выбор начального значения штрафного параметра.

Полученные результаты вычислительного эксперимента подтвердили работоспособность предложенных методов, равно как и чрезвычайную сложность двухуровневых задач исследуемого класса.

1.Orlov A.V. On a Global Search in Bilevel Optimization Problems with a Bimatrix Game at the Lower Level // Lecture Notes in Computer Science: Mathematical Optimization Theory and Operations Research, MOTOR 2024. 2024. Vol. 14766. P. 272–287.
2. Orlov A.V. On Solving Bilevel Optimization Problems with a Nonconvex Lower Level: the Case of a Bimatrix Game. // Lecture Notes in Computer Science: Mathematical Optimization Theory and Operations Research, MOTOR 2021. 2021. Vol 12755. P. 235–252.
3. Strekalovsky A.S. On global optimality conditions for D.C. Minimization problems with D.C. Constraints // Journal of Applied and Numerical Optimization. 2021. Vol. 3, No. 1. P.175–196.
4.Стрекаловский А.С., Орлов А.В. Линейные и квадратично-линейные задачи двухуровневой оптимизации. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019.
5. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. М: Наука, 1983.
6. Алексей Савватеев. Теория игр. Лекция 12. URL: https://vk.com/wall-49284819_1046 (дата обращения: 15.10.2025).

РАСПОЗНАВАНИЕ ЗАГОЛОВКОВ ТАБЛИЦ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ*

И. И. Охотин
Институт динамики систем и теории управления имени В. М Матросова СО РАН
ilia.ohotin@yandex.ru

Автоматическое распознавание заголовков таблиц остаётся одной из ключевых задач анализа табличных данных, особенно при наличии многоуровневых заголовков, объединённых ячеек и нестандартных макетов. Современные методы на основе нейросетей и трансформеров демонстрируют прогресс, однако всё ещё ограничены в работе с такими сложными структурами. Появление больших языковых моделей (БЯМ) открыло новые возможности, однако влияние промпт-инжиниринга на качество распознавания до настоящего времени оставалось малоизученным [1, 2].

В работе предложена методология оценки эффективности БЯМ в задаче распознавания заголовков таблиц. Проведено масштабное экспериментальное исследование, включающее восемь моделей различного размера (от 7 млрд. до 405 млрд. параметров) и шесть стратегий промптинга – от zero-shot до few-shot с многошаговыми инструкциями. В качестве тестового корпуса использована выборка из 237 таблиц из датасета PubTables-1M [3], преобразованных в формат pandas DataFrame и снабжённых разметкой заголовков.

Результаты экспериментов показали, что:

– размер модели является ключевым фактором: крупные модели (405B параметров) достигают F1-метрики ≈ 0.80-0.85, тогда как малые (7-24B) – лишь 0.06-0.30;

– сложные промпты повышают качество только у средних и крупных моделей, тогда как у малых приводят к деградации из-за перегрузки контекста;

– наибольшие трудности для всех моделей связаны с многоуровневыми заголовками и объединёнными ячейками;

– простые и минималистичные промпты оказываются наиболее надёжной стратегией для большинства моделей.

Практическая значимость работы заключается в выявлении оптимальных конфигураций «*модель* + *промпт*» для различных сценариев. Так, для крупных моделей достаточно кратких инструкций, тогда как для средних оптимальны пошаговые промпты с критериями поиска. Полученные результаты открывают перспективы для разработки универсальных инструментов автоматического анализа табличных данных, а также указывают направления будущих исследований, включая расширение корпуса сложных таблиц и создание русскоязычного набора данных.

1. Dong H., Wang Z. “Large Language Models for Tabular Data: Progresses and Future Directions”. In: Proceedings of the 47th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR’24), 2024, P. 2997–3000. DOI: 10.1145/3626772.3661384.

2. Sui Y., Zhou M., Han S., Zhang D. “Table Meets LLM: Can Large Language Models Understand Structured Table Data? A Benchmark and Empirical Study”. In: Proceedings of the 17th ACM International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM’24). 2024, P. 645–654. DOI: 10.1145/3616855.3635752.

3. Smock B., Pesala R., Abraham R. “PubTables-1M: Towards comprehensive table extraction from unstructured documents”. In: 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022, P. 4634–4642. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00459.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9).

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ГЛОБАЛЬНЫЙ ПОИСК В ЗАДАЧЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ С ЧАСТИЧНЫМ ПРИВЛЕЧЕНИЕМ УЧИТЕЛЯ*

М. С. Охотина, Т. В. Груздева, А. В. Ушаков
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
ms.okhotina@icc.ru, gruzdeva@icc.ru, aushakov@icc.ru

В работе рассмотрена задача кластеризации, основанная на модели k-means, которая сформулирована как задача минимизации суммы квадратов расстояний между объектами и центрами соответствующих кластеров (center-based clustering). Классическая постановка задачи расширена с учётом экспертных знаний и известных свойств кластеров, то есть информации о связях между объектами (semi-supervised clustering [1,2,3], ограничения типа must-link и cannot-link) и представляет собой следующую оптимизационную задачу:

$$\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \parallel y^i - a^j \parallel^2 \downarrow \min_{(x,y)}, \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{k} x_{ij} = 1 \qquad \forall\ j = 1, \dots, m; \tag{2}$$

$$x_{ij_1} - x_{ij_2} = 0 \qquad \forall\ i = 1, \dots, k; \quad \forall\ (j_1, j_2) \in M; \tag{3}$$

$$x_{ij_3} + x_{ij_4} \leq 1 \qquad \forall\ i = 1, \dots, k; \quad \forall\ (j_3, j_4) \in L; \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \geq \gamma \qquad \forall\ i = 1, \dots, k; \tag{5}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall\ i = 1, \dots, k; \quad \forall\ j = 1, \dots, m. \tag{6}$$

Целевая функция (1) минимизирует ошибку кластеризации. Переменные x_{ij} отвечают за принадлежность элемента j к кластеру i: $x_{ij} = 1$, если элемент данных j назначен кластеру i; $x_{ij} = 0$, в противном случае, $i = 1, \dots, k$, $j = 1, \dots, m$. Ограничения (2) гарантируют, что каждый элемент данных будет назначен ровно одному кластеру. Ограничения (3)-(4) обеспечивают назначение элементов данных из множества M одному кластеру (must-link constraints (3)), а из множества L – разным кластерам (cannot-link constraints (4)). Ограничения на размер кластеров (5) определяют нижнюю границу количества элементов данных в каждом кластере.

Очевидно, что при заданном разбиении на кластеры (x_{ij} фиксированы) целевая функция (1) оказывается выпуклой, и, используя классические условия оптимальности, можно вычислить векторы координат центров кластеров:

$$y^i = \frac{\sum_{t=1}^{m} x_{it} a^t}{\sum_{t=1}^{m} x_{it}}.$$

В то же время замена ограничений (6) на ограничения

$$x_{ij}^2 - x_{ij} \geq 0, \quad 0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, k,\ j = 1, \dots, m, \tag{7}$$

дает возможность сформулировать исследуемую задачу кластеризации как непрерывную оптимизационную задачу. А возможность представления целевой функции и невыпуклых ограничений (7) посредством разности выпуклых функций (DC-функций) позволяет рассматривать задачу (1)-(5), (7) как задачу DC оптимизации [3]:

$$\left.\begin{array}{c} h(x) \uparrow \max, \quad x \in S \cap S_M \cap S_L \subset R^{k \times m} \\ g_i(x^i) \geq 0, \quad i = 1, \dots, k, \end{array}\right\} \qquad (DC)$$

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 25-21-00304.

где $g_i(x) = \left\| x^i - \frac{e}{2} \right\|^2 - \frac{m}{4},\ i = 1, \dots, k;\quad h(x) = -\sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{m} x_{ij} \left\| \frac{\sum_{t=1}^{m} x_{it} a^t}{\sum_{t=1}^{m} x_{it}} - a^j \right\|$ – выпуклые функции, $S = \left\{ x_{ij} \in [0,1] : \sum_{i=1}^{k} x_{ij} = 1,\ \sum_{j=1}^{m} x_{ij} \geq \gamma,\ i = 1, \dots, k,\ j = 1, \dots, m \right\}$,

S_M и S_L, заданные ограничениями (3) и (4) соответственно, – выпуклые множества. Выпуклость $h(\cdot)$ доказана в [2], $g_i(\cdot)$ получены суммированием квадратичных ограничений из (7), $x^i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$.

Для решения задачи (DC) разработан подход, основанный на Теории глобального поиска в задачах DC оптимизации [4]. Алгоритм состоит из двух основных модулей:

1) специализированного локального поиска [5], в основе которого лежит решение серии линеаризованных (в точке $x^s \in D = S \cap S_M \cap S_L$) задач:

$$\left.\begin{array}{l} \langle \nabla h(x^s), x \rangle \uparrow max, \quad x \in D, \\ \langle \nabla g_i(x^s), x - x^s \rangle + g_i(x^s) \geq 0, \quad i = 1, \dots, k \end{array}\right\} \qquad (LDC)$$

2) процедуры выхода из критических точек z^p, полученных на этапе локального поиска, которая базируется на условиях глобальной оптимальности и включает

- построение набора точек w^l, аппроксимирующих поверхность уровня $h(\cdot) = h(z^p)$;
- решение линеаризованных (в точках w^l) задач (LDC);
- проверку условий оптимальности.

Поскольку решение линеаризованных задач осуществляется с любой точки поверхности уровня независимо, на данном этапе реализовано параллельное их решение.

Были проведены вычислительные эксперименты на наборах данных из репозитория KEEL. Решение линеаризованных задач осуществлялось с помощью пакета SCIP 9.1, параллельная реализация выполнена на основе технологии MPI. В качестве базового метода сравнения использовался классический алгоритм Ллойда (k-means).

Предложенный DC-подход обеспечивает более низкие значения функции ошибки и лучшие внешние метрики кластеризации по сравнению с алгоритмом k-means при различных долях must-link и cannot-link ограничений в задаче.

1. Gancarski, P., Dao, T.B.H., Cremilleux, B., Forestier, G., Lampert, T.: Constrained clustering: Current and new trends. In: Marquis, P., Papini, O., Prade, H. (eds.) A Guided Tour of Artificial Intelligence Research: V. II: AI Algorithms, pp. 447-484. Springer, Cham, 2020.
2. Xia, Y.: A global optimization method for semi-supervised clustering. Data Min. Knowl. Disc. 2009. V. 18, pp. 214-256.
3. Gruzdeva T.V., Ushakov A.V.: Semi-supervised K-Means Clustering via DC Programming Approach. Lecture Notes in Computer Science. 2023. V. 13930, pp. 54-67.
4. A.S. Strekalovsky. Global optimality conditions in nonconvex optimization. J. Optim. Theory Appl. 2017. V. 173. pp. 770-792.
5. Strekalovsky, A.S.: On local search in d.c. optimization problems. Appl. Math. Comput. 2015. V. 255, pp. 73-83.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЛИТИЕВЫХ ИОННЫХ БАТАРЕЙ

Пан Чхоль Хо, Ем Ен Ир
Факультет науки и техники материалов,
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
pch801214@star-co.net.kp

Сегодня литиевые ионные батареи широко используются в качестве элементов хранения энергии в электромобилях и портативных электронных продуктах. Однако, с течением времени ёмкость батареи уменьшается из-за старения и потерь энергии, что ограничивает производительность батареи. Поэтому точная оценка долговечности батареи является неотложным требованием для потребителей, и это исследование активно было проведено.

Серая модель была разработана в 1982 году на основе теории серой системы[1].

Эта модель широко применяется в области прогнозирования, поскольку можно рассматривать даже в случае небольшого количество данных, необходимых для понимания характеристик объекта[2].

Модель СМ(1,1) использует небутонные данные в качестве исходных данных, а примитивная последовательность данных $x^{(0)}$ выражается следующим образом.

$$X^{(0)} = \left\{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), ..., x^{(0)}(n)\right\}, \quad k = 1, 2, \dots, n \tag{1}$$

Здесь $x^{(0)}$ монотонно увеличивается или уменьшается, или колебательная последовательность.

Чтобы улучшить точность прогнозирования модели, предварительная обработка данных выполняется с использованием геометрически неравномерного оператора взвешенного релаксации (*P*).

$$Y = XP = \left\{\left(x(1)\right)^{r_1} \cdot \left(x(n)\right)^{1-r_1}, \left(x(2)\right)^{r_2} \cdot \left(x(n)\right)^{1-r_2}, .., x(n)\right\}, \ r_k \subset [0,1] \ \ k = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

Здесь $y^{(0)}(k) = x(k)\,p = \left(x(k)\right)^{r_k} \cdot \left(x(n)\right)^{1-r_k} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad x(k)>0$

Поэтому первый кумулятивный оператор (1-ко) является следующим.

$$y^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^{i} y^{(0)}(k) \tag{3}$$

Здесь $y^{(1)}(1)$ равно $y^{(0)}(1)$.

Нелинейная серая модель Берноила(НСМБ(1, 1)) рассматривает нелинейное поведение исходных данных более точно, чем традиционная серая модель. И его особый случай-это традиционная серая модель. Его белые дифференциалы и серое разностное уравнение следующие.

$$\frac{dy^{(1)}(k)}{dt} + az^{(1)}(k) = b\left(z^{(1)}(k)\right)^{\lambda} \qquad k=2, 3, \dots n, \tag{4}$$

$$y^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b\left(z^{(1)}(k)\right)^{\lambda} \tag{5}$$

В традиционной модели СМ(1, 1) *q* равен 0.5.

Фоновое значение *z* с применением неоднородных весовых коэффициентов выражено следующим образом.

$$z^{(1)}(k) = q_k y^{(1)}(k) + (1-q_k) y^{(1)}(k-1) \qquad q_k \in [0,1] \quad k= 2, \dots, n \tag{6}$$

Если найдут решение уравнения (4) с помощью метода наименьших квадратов, товыражено следующим образом.

$$\hat{y}^{(1)}(k)=\left[\left(y^{(1)}(1)^{1-\lambda}-\frac{b}{a}\right)e^{-a(1-\lambda)(k-1)}+\frac{b}{a}\right]^{1/(1-\lambda)} \tag{7}$$

Поэтому значение предсказания исходных данных из уравнений (2) и (3) является следующим образом.

$$\hat{x}^{(0)}(k)=\left(\hat{y}^{(0)}(k)\left(x^{(0)}(n)^{1/(1-r_k)}\right)\right)^{1/r_k} \tag{8}$$

Относительная остаточная ошибка из уравнения (14) представлена следующим образом.

$$e^{(0)}(i)=\frac{x^{(0)}(i)-\hat{x}^{(0)}(i)}{x^{(0)}(i)} \qquad i=1,2,\ldots,n \tag{9}$$

Если $e^{(0)}(i)$ уменьшается, точность прогнозирования будет обновлена. Таким образом, мы использовали марковскую модель для прогнозирования остаточной ошибки [3].

Чтобы определить соответствующие параметры(r_i, λ, q_i, i=1,…,), мы использовали Алгоритм оптимизации квантовых частиц, а адаптивная функция является следующим.

$$fitness=\min_{r_i,\lambda,q_i}\sum_{t=1}^{n}\frac{\left|x^{(0)}(t+w)-\tilde{x}^{(0)}(t+w)\right|}{x^{(0)}(t+w)} \tag{10}$$

В следующем разделе, предлагаемая модель представлена моделью УГПНСМБ (1,1)(Улучшенная геометрическая переменная нелинейная серая модель Берноила)

Для оценки точности модели мы использовали среднюю абсолютную ошибку (САО), среднюю квадратную ошибку(СКО) и среднюю абсолютную процентную ошибку(САПО)[3], и представили следующим.

Чтобы оценивать точности предлагаемой модели УГПНСМБ(1,1), производили сравнительный анализ со смешанными серыми моделями, такие как МСМ (метаболическая серая модель) и МНСМБ (метаболическая нелинейная серая модель Берноила). В качестве экспериментальных данных использовались исходные данные в [4].

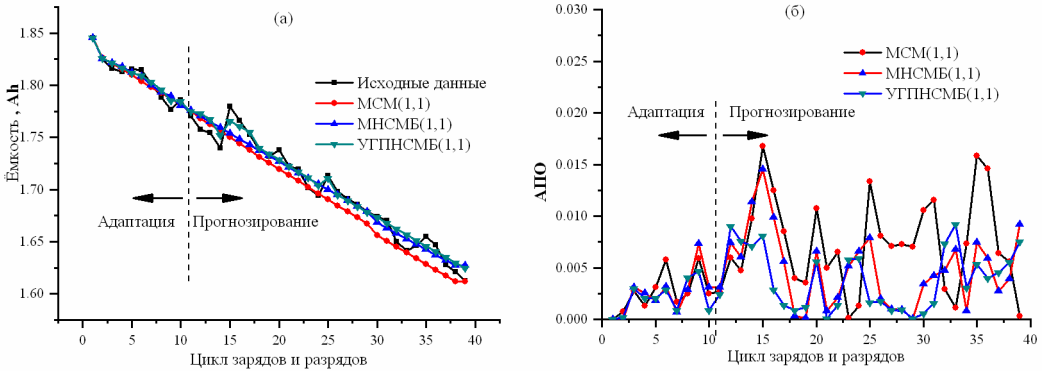


Рисунок 1. Прогнозирование сравнения различных серых моделей

На рис. 1 исходные данные имеют тенденцию к линейному снижению и колебаются в некоторых интервалах. В то время модели МСМ(1,1) и МНСМБ(1,1) почти монотонно уменьшаются с тенденцией снижения исходных данных. Однако модель УГПНСМБ(1,1) улучшила точность моделирования путём моделирования колебаний исходных данных с линейной тенденцией снижения в области адаптации и прогнозирования (таблица 1).

Таблица 1 – Оценка точности модели на рис.1

Модель	Область адаптации			Область прогнозирования		
	САО	СКО	САПО	САО	СКО	САПО
МСМ(1,1)	0.004717	0.005762	0.00262	0.012402	0.014602	0.007277
МНСМБ(1, 1)	0.004435	0.005702	0.002469	0.008272	0.010355	0.004844
УГПНСМБ(1,1)	**0.003691**	**0.004571**	**0.002051**	**0.006614**	**0.008246**	**0.003899**

Предложение. Предлагаемая модель эффективна для прогнозирования долговечности литиевых ионных батарей, а также может быть применена для прогнозирования характеристик объектов, где исходные данные недостаточны.

1. J. Deng, Control problem of grey systems. Syst. Control Lett., 1982, 1(4):288–94.
2. S. Ding, W. Keith, Y. Dang, Forecasting China's electricity consumption using a new grey prediction model, Energy 2018, 149: 314-328.
3. D. Fan, C. Pang, J. Kim, S. Jon X. Gu, Forecasting the self-sufficiency rate of China’s energy by the hybrid gray models, Energy Sources A: Recovery, Util. Environ. Eff., 2019, 41(1): 2999-3018.
4. L. Chen, W. Lin, J. Li, B. Tian, H. Pan, Prediction of lithium-ion battery capacity with metabolic grey model, Energy, 2016, 106: 662-672.

РАСЧЁТ ЭФФЕКТИВНОЙ ЖЕСТКОСТИ НЕОДНОРОДНОЙ СЕТКИ ПРУЖИН*

И. В. Пантелеев, В. Е. Архинчеев, Б. В. Хабитуев, С. П. Мальцев, Д. Ф. Дерюгин
Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
vanya.panteleev.03@mail.ru, varkhin@mail.ru

Оценка эффективных упругих свойств гетерогенных и композитных материалов является одной из фундаментальных задач механики сплошной среды и материаловедения [1]. Такие материалы обладают сложной внутренней структурой, которая определяет их макроскопическое механическое поведение. Теоретическое предсказание и численное моделирование этих свойств критически важны для проектирования новых материалов с заданными характеристиками в аэрокосмической, автомобильной и строительной отраслях. В случаях дискретных моделей, в частности, сетки пружин (spring networks), предоставляют мощный и гибкий инструмент для исследования [3]. Они позволяют наглядно смоделировать влияние локализованных дефектов, таких как трещины, поры или участки с пониженной жесткостью, на макроскопический отклик материала.

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ двух принципиально различных алгоритмов расчета эффективной жесткости крупномасштабной неоднородной сетки пружин, имитирующей композитный материал с упрочняющими включениями и дефектами. В работе исследуется, наличие ослабленных и усиленных элементов которые влияет на общую жесткость системы в зависимости от выбранной модели усреднения, что является классической проблемой механики композитов [1, 2].

1. Методология эксперимента

1.1. Модель системы.

Моделируется двумерная сетка, состоящая из 20×20 узлов, соединённых горизонтальными и вертикальными пружинами. Базовая жёсткость каждой пружины Kbase=100 (условные единицы). В исходную систему последовательно вносятся модификации двух типов:

1. **Усиленные пружины:** их жёсткость Kstrong равномерно увеличивается в диапазоне от 100 до 30000 с шагом 10.
2. **Ослабленные пружины:** их жёсткость Kweak фиксирована на уровне 50 или 10

Модификации вносятся до достижения общего количества изменённых пружин Nmod=200. После этого добавление ослабленных пружин прекращается.

1.2. Алгоритмы расчёта эффективной жёсткости.

Алгоритм 1 (Последовательно-параллельная схема для перпендикулярной силы):

Для горизонтальной силы: ряды пружин, ориентированные перпендикулярно направлению силы (вертикальные столбцы), рассматриваются как слои с параллельно соединёнными пружинами. Жёсткость каждого такого слоя Klayer вычисляется как сумма жёсткостей всех пружин в столбце.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда No 24-21-00356, https://rscf.ru/project/24-21-00356.

Полученные слои считаются соединёнными последовательно. Эффективная жёсткость системы для горизонтальной силы *K*eff, hor рассчитывается по формуле для последовательного соединения:

$$\frac{1}{k_{\text{eff, hor}}} = \sum \frac{1}{k_{\text{layer}_i}}.$$

Аналогичная процедура применяется для вертикальной силы *K*eff, vert.

Общая эффективная жёсткость системы принимается как среднее арифметическое:

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\text{eff, hor}} + k_{\text{eff, vert}}}{2}$$

Алгоритм 2 (Параллельно-последовательная схема для сонаправленной силы):

Для горизонтальной силы: берутся слои, сонаправленные с силой, где пружины последовательные. Полученные слои считаются соединёнными параллельно. Эффективная жёсткость для горизонтальной силы *K*eff, hor вычисляется как сумма жёсткостей всех слоёв.

Процедура повторяется для вертикальной силы, и общая жёсткость также определяется как среднее арифметическое.

2. Результаты и обсуждение

Рассмотрим результаты расчётов. В качестве основной характеристики будем рассматривать зависимость эффективной жёсткости от количества модифицированных пружин. На рисунках по оси X - кол-во модифицированных пружин (вместе с ослабленными). По оси Y - кол-во эффективная жёсткость**.**

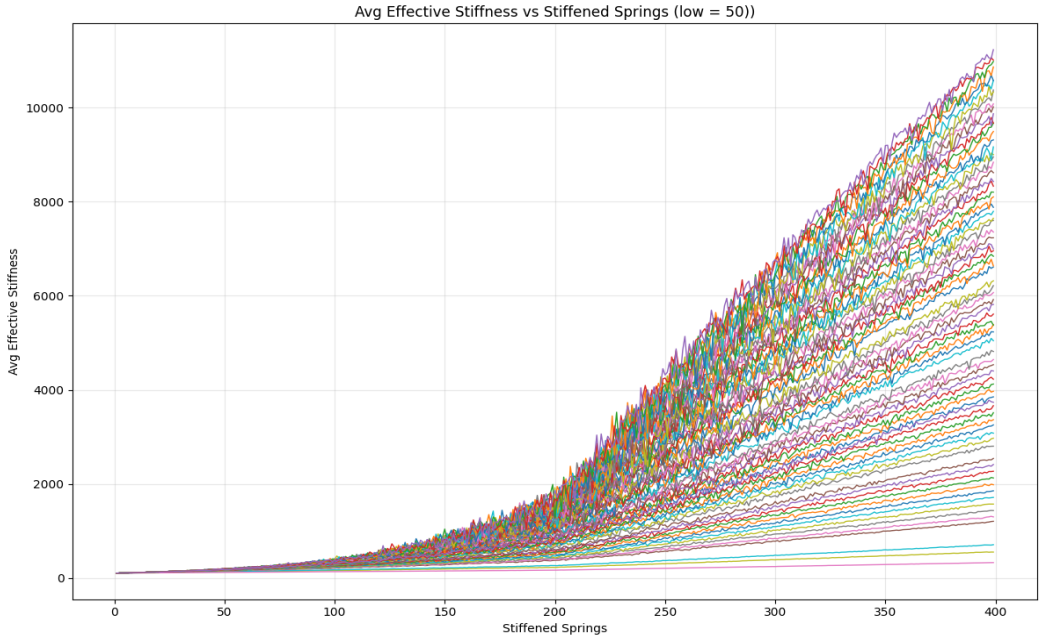


График 1. Зависимость эффективной жёсткости от количества модифицированных пружин, жёсткость ослабленных пружин 50 (Алгоритм 1)

Наблюдается монотонный рост эффективной жёсткости *K*eff с увеличением количества модифицированных пружин *N*mod. Рост менее выражен, чем в системе без ослабленных пружин, что указывает на демпфирующий эффект дефектов.

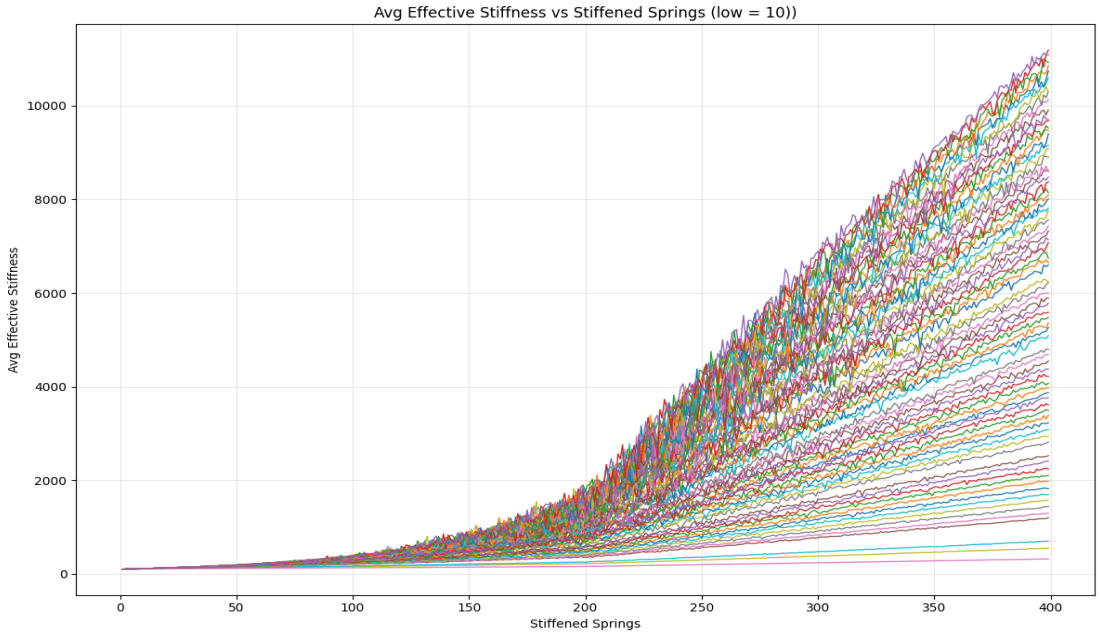


График 2. Зависимость эффективной жёсткости от количества модифицированных пружин, жёсткость ослабленных пружин 10 (Алгоритм 1)

Качественная картина сохраняется. Даже при значительном снижении жёсткости ослабленных элементов (*K*weak=10), система сохраняет способность к увеличению общей жёсткости за счет усиленных элементов.

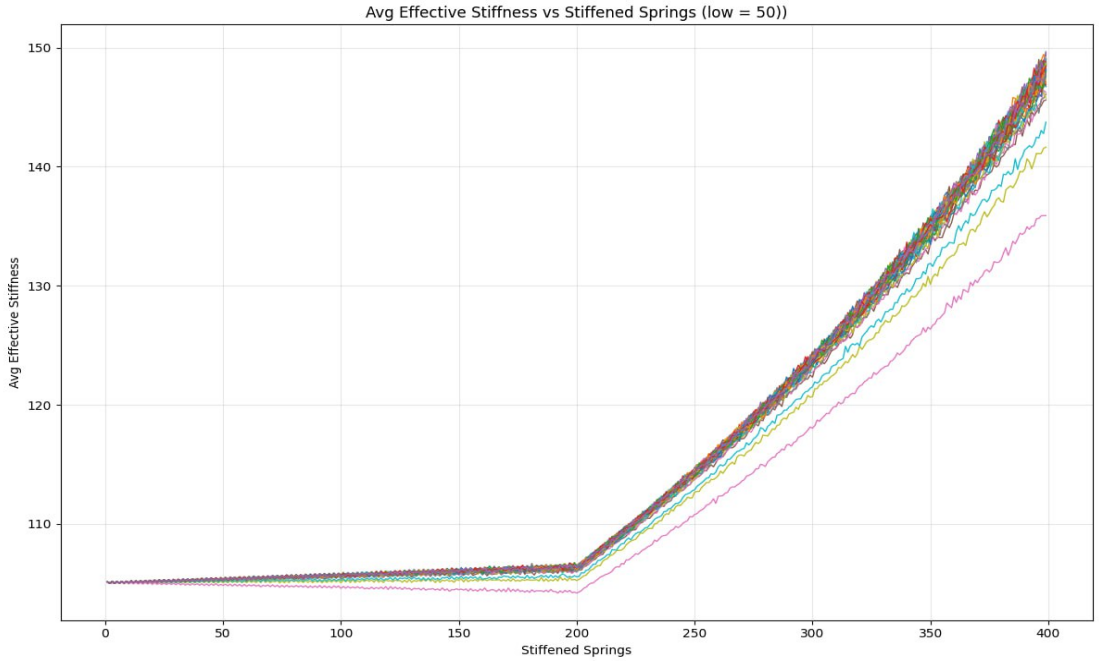


График 3. Зависимость эффективной жёсткости от количества модифицированных пружин, жёсткость ослабленных пружин 50 (Алгоритм 2)

Наблюдается принципиально иное поведение. Эффективная жёсткость остаётся практически неизменной на низком уровне, пока в системе присутствуют

ослабленные пружины. Рост *K*eff начинается только после того, как *N*mod превышает 200 и добавление дефектов прекращается.

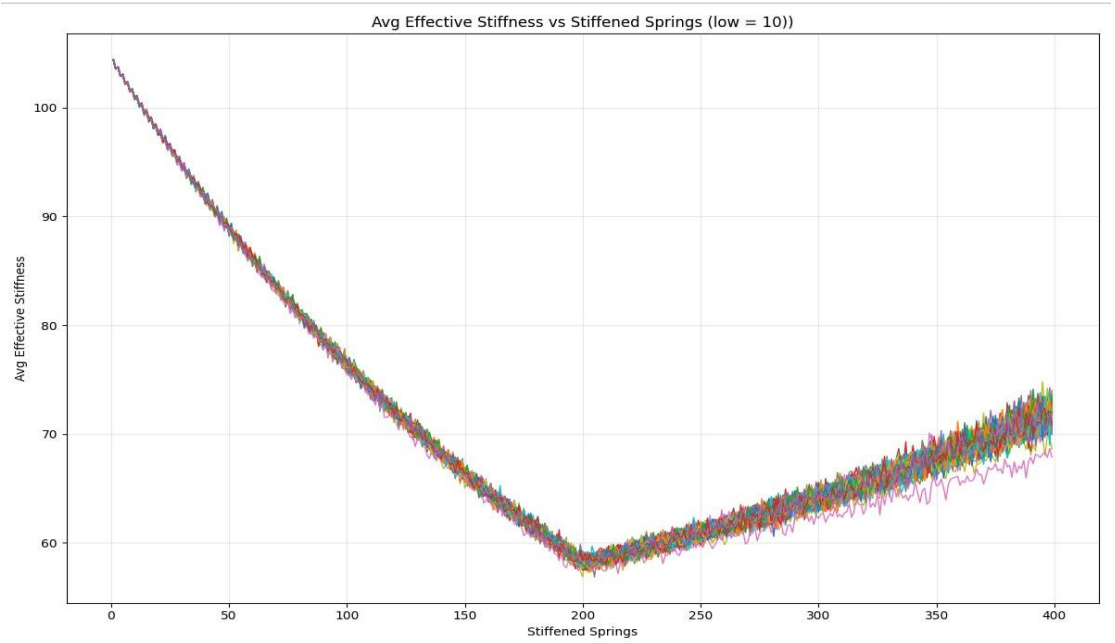


График 3. Зависимость эффективной жёсткости от количества модифицированных пружин, жёсткость ослабленных пружин 50 (Алгоритм 2)

При увеличении степени дефектности (*K*weak =10) эффективная жёсткость не только не растёт, но и демонстрирует значительное снижение с увеличением *N*mod.

Выводы:

Проведённое моделирование наглядно демонстрирует, что оценка механических свойств неоднородных сред (композитов) сильно зависит от выбранной модели усреднения.

1. **Алгоритм 1** оказался устойчивым к наличию локальных ослаблений. В этой модели "сильные" элементы эффективно компенсируют наличие «слабых».
2. **Алгоритм 2** оказался крайне чувствительным к «слабым звеньям».

1. Christensen, R. M. (2012). Mechanics of Composite Materials. Dover Publications.
2. Sahimi, M. (2003). Heterogeneous Materials I: Linear Transport and Optical Properties. Springer.
3. Van der Giessen, E., & Needleman, A. (1995). Micromechanics simulations of fracture. In Annual Review of Computational Physics III (pp. 191-240). World Scientific.

ФОРМИРОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ДОКЛАДОВ О СОСТОЯНИИ И ОБ ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

В. В. Парамонов, А. О. Шигаров
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
slv@icc.ru, shigarov@icc.ru

В России существует система государственного экологического мониторинга. Результаты публикуются в ежегодных сборниках государственных докладов (далее – ГД) [1] как в бумажном виде, так и в виде PDF-документов, свободно доступных в сети Интернет на информационном портале Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (https://www.mnr.gov.ru/docs). Ценность информации, содержащейся в ГД, состоит в том, что сбор данных осуществляется в соответствии со стандартизированными методологиями, данные проверяются и имеют юридическую значимость. По состоянию на 2025 год опубликовано 30 сборников, что дает возможность предоставить согласованные долгосрочные наборы данных, которые необходимы для отслеживания изменений в экосистемах, уровней загрязнения, биоразнообразия, антропогенного воздействия и последствий для климата. В ГД присутствует большое количество таблиц, содержащих статистические данные экологического мониторинга по разным показателям и районами Байкальской природной территории (БПТ). Однако они представлены в неструктурированной и полуструктурированной форме в нередактируемом формате PDF, что существенно ограничивает возможности их использования и снижает ценность. В связи с этим актуальна задача извлечения и преобразования необработанных данных в структурированный формат, пригодный для анализа [2]. Следует отметить, что ежегодно публикуемые ГД имеют подобную структуру документа – основные разделы, описывающие результаты экологического мониторинга имеют одинаковую нумерацию; таблицы нумеруются в рамках одного раздела; структура организации данных в таблицах по одной тематике является подобной. Это делает возможным автоматизировать извлечение табличных данных, трансформацию в реляционный вид и публикацию. Решение задачи состоит из таких блоков как: анализ; структурирование; публикация данных.

На стадии анализа проводится экспертная оценка структуры всех таблиц. В соответствии со структурой таблиц проводится их разбиение на классы. Всего выделено 23 класса. Таким образом, формируется таксономия типов таблиц. Для сформированных классов разрабатываются RTL-паттерны [3]. RTL-паттерн описывает структуру таблицы, включающую один или несколько шаблонов строк, в каждый из которых вложены один или несколько шаблонов ячеек. При этом шаблоны ячеек могут быть сгруппированы в шаблоны подстрок, которые, в свою очередь, образуют шаблоны строк. Каждый шаблон ячейки может определять действия для генерации и связывания семантических элементов, а также любые ограничения, которым должны соответствовать соответствующие ячейки. Каждый шаблон в подструктуре может сопровождаться квантификаторами, указывающими, сколько раз он повторяется в общей структуре таблицы. Таким образом, были разработаны 23 паттерна. Они могут применяться повторно для извлечения и нормализации таблиц, содержащихся в ГД за другие годы.

На стадии структурирования данных проводится их извлечение. Для этого возможно использовать штатные средства таких пакетов как Microsoft Office и Adobe

Acrobat. Они позволяют извлечь из PDF-документа только таблицы и представить их в редактируемом формате – Excel (xlsx). Фактически извлекаются таблицы и окружающая их информация: номер, название таблицы, возможно текст, идущий сразу после таблицы. Таким образом, для извлеченных таблиц требуется редуцирование текста, не относящегося к таблице, а также трансформация структуры ячеек и приведение изменение разделителей к одному виду. Подобная коррекция позволяет представить оформление таблиц в одном стиле, что упрощает создание паттернов. Скорректированные таблицы обрабатываются в соответствии с RTL-паттернами. На выходе формируется записи в реляционной форме. Записи по одной теме, извлечённые из ГД за разные годы, объединяются в один набор. Такой набор представляет записи в нормализованном (реляционном) виде и сохраняется как файл в формате CSV или Excel.

Для публикации файлы с реляционными данными загружаются на Геопортал ИДСТУ СО РАН [4]. На основании названия полей и типов данных в режиме конструктора Геопортала задается метаинформация, по которой автоматически создаются таблицы базы данных. В них загружаются нормализованные табличные данные, извлеченные из ГД. Они представлены в свободном доступе по адресу: https://geos.icc.ru. Имеется возможность осуществлять выборку, агрегирование данных. Существует возможность осуществить пространственную привязку территорий для построения тематических карт.

В работе предложен подход к извлечению табличных данных из нередактируемых PDF-документов. Методика апробирована на данных, представленных в ГД экологического мониторинга оз. Байкал за период с 2016 по 2022 г. Предложенная методика может быть применена для извлечения таблиц из ГД за другие годы, при этом большинство этапов публикации будет осуществляться автоматизировано. Публикация данных в виде открытых данных повышает их ценность и предоставляет возможность использования в научных исследованиях.

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

1. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2019 году». – Иркутск: АНО «КЦ Эксперт», 2020. – 344 с.
2. AlMasaud, A., Sampaio, S. and Sampaio, P., 2024. Mining Data Wrangling Workflows for Design Patterns Discovery and Specification. Information Systems Frontiers, pp.1-24.
3. Shigarov, A.: Regular table language for data extraction from document tables accessible in machine-readable formats. Lobachevskii Journal of Mathematics 46(4), 2025. – pp. 1495–1510
4. Fedorov R., Ruzhnikov G., Shumilov A. Geoportal of ISDCT SB RAS // Abstracts of The Conference Information Technologies in The Research of Biodiversity. Irkutsk. – 2018. pp. 68-69.

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ КОМПОЗИТНЫХ СЕРВИСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА БУЛЕВЫХ СЕТЕЙ

А. А. Пашинин, Г. А. Опарин, В. Г. Богданова
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
apcrol@gmail.com, prn51@icc.ru, bvg@icc.ru

Широта спектра приложений двоичных динамических моделей к задачам искусственного интеллекта, биоинформатики, экологии, социологии, робототехники, криптографии, классификации, исследования отказоустойчивости компьютерных сетей, а также разнообразным задачам во многих других областях актуализирует проблему создания эффективной технологии качественного исследования динамических свойств различных классов двоичных моделей высокого порядка на конечном интервале времени. Основой такой технологии является разработанный авторами метод булевых ограничений [1], позволяющий свести исходную задачу к задаче булевой выполнимости (SAT) или к задаче проверки истинности квантифицированной булевой формулы (QBF). Программная реализация метода выполнена в виде пакета прикладных микросервисов (Applied Microservices Package, AMP [2]). Процесс компьютерного решения задач качественного анализа представляется в виде пошагового выполнения вычислительных микросервисов, реализованных на основе программных модулей из множества M, работающих над общим полем переменных Z, являющихся их фактическими параметрами. Переменные величины из Z выступают в роли выделенных понятий качественного анализа булевых сетей и одновременно параметров постановки задачи и поэтому имеют самостоятельную прикладную семантику. Непроцедурная постановка задачи состоит в том, что требуется найти искомые величины из $B_0 \subset Z$, используя другие величины $A_0 \subset Z$, значения которых считаются известными. Решением такой вычислительной задачи $T = (A_0, B_0)$, если оно существует, является композиция функций, извлекаемых из вычислительной модели AMP как сети функциональных отношений вычислимости величин. Для того, чтобы доказывать существование решения, не требуется знать, как вычисляются составляющие его функции (т.е. модули из M) – достаточно знать только имена этих функций (множество символов операций F) и связанные с этими именами множества имен входных и выходных параметров из Z. Доказательство существования должно быть конструктивным в том смысле, что в процессе доказательства должен быть построен план решения задачи (схема композитного сервиса).

Под композитным сервисом понимается множество информационно связанных микросервисов или других составных сервисов, обладающих большей степенью детализации по сравнению с монолитным приложением [3]. В основе предложенной технологии разработки композитного сервиса лежит метод булевых ограничений, матрично-векторная булева дифференциальная модель построения схемы композитного сервиса (плана вычислительных действий) и инструментальные средства интеллектуальной вычислительной платформы HPCSOMAS-MSC [4]. Наш подход к построению схемы композитного сервиса основан на систематическом использовании двоичных динамических систем в качестве основного формализма внутреннего представления вычислительной модели предметной области. Условия задачи построения такого сервиса из уже реализованных вычислительных микросервисов сформулированы в виде системы дифференциальных булевых

уравнений [5], решения которых при заданных начальных условиях (согласованных с непроцедурной постановкой задачи) определяют разрешимость поставленной задачи и дают конструктивные планы ее решения (в том числе и параллельные). Поиск плана в этих условиях сводится к построению частных решений таких динамических систем. Сократить вычислительные затраты позволяет применение двоичных динамических моделей, которые обеспечивают выполнение всех необходимых для решения задачи поиска плана преобразований только с использованием быстродействующих операций алгебры логики над двоичными переменными.

В докладе рассматривается реализация предложенной технологии разработки композитного сервиса, включающей этапы построения схемы сервиса, формирования интерфейса, включения нового сервиса в состав AMP с помощью средств HPCSOMAS-MSC. Средствами этой платформы сервисы создаются при помощи унифицированных шаблонов. Согласно полученной схеме агентом HPCSOMAS из базы знаний AMP выбираются описания вычислительных микросервисов и их входных и выходных параметров, после чего на основе готового класса-шаблона формируется новый вычислительный сервис. Такой сервис регистрируется в системе и становится доступным по уникальному URL, при этом вся логика взаимодействия с запускающими его агентами HPCSOMAS и базовой инфраструктурой скрыта в наследуемых классах. Внутри таких специализированных классов реализуется обработка входных параметров, подготовка рабочей среды, копирование необходимых файлов и запуск вычислительных модулей с передачей фактических параметров, после чего результаты автоматически формируются и возвращаются пользователю или в следующий вычислительный сервис для дальнейшей работы. Такой подход позволяет разработчику сосредоточиться исключительно на алгоритмической части задачи, а все операции по подготовке рабочей среды, организации обмена данными и сбору результатов выполняются автоматически средствами системы.

Конфигурация сервисов описывается в JSON-файлах, что обеспечивает гибкость и возможность корректировки параметров без перекомпиляции кода. Для интеграции нового сервиса в мультиагентную среду достаточно зарегистрировать его через интерфейс агента или с помощью утилиты редактирования HPCSOMAS ABCSW, после чего он становится доступным для выбора и запуска через графическую форму на веб-странице. Такой подход упрощает процесс добавления новых вычислительных сервисов, обеспечивает стандартизацию взаимодействия и позволяет масштабировать систему за счет независимого подключения новых сервисов на разных вычислительных ресурсах.

В докладе приводятся примеры построения композитных сервисов для решения ряда задач качественного анализа булевых сетей на основе представленной технологии.

1. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Qualitative analysis of autonomous binary dynamic systems // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. 2019. V. 10(3). P. 407–419.
2. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A., Gorsky S.A. Microservice-oriented Approach to Automation of Distributed Scientific Computations // IEEE: Proc. of the 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Opatija, Croatia, 2019. P. 236–241.
3. Huf A., Siqueira F. Composition of heterogeneous web services: A systematic review // Journal of Network and Computer Applications 2019. V. 143. P. 89–110.

4. Опарин Г.А., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Технология качественного исследования двоичных динамических систем в микросервисной инфраструктуре // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 4(28). С. 137-148.
5. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Binary dynamic models of structural synthesis of programs // IEEE: Proc. of the 46th MIPRO ICT and Electronics Convention. Opatija, Croatia, 2023. P . 1010–1015.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НА РЕГИОНАЛЬНЫХ СЦЕНАРИЯХ*

А. В. Пененко, Е. В. Русин, Э. А. Пьянова, М. К. Емельянов, А. В. Гочаков, В. В. Пененко
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
aleks@ommgp.sscc.ru

Алгоритмы усвоения данных широко используются для оперативного и квазиоперативного контроля качества воздуха. В современной версии алгоритмов мы рассматриваем задачу усвоения данных для нестационарных моделей как последовательность связанных обратных задач восстановления пространственно-временной структуры функций состояния с учетом различных наборов данных измерений, поступающих в процессе моделирования. Усвоение данных осуществляется с помощью идентификации по данным изменений некоторой внутренней искомой функции модели, которую мы называем функцией неопределенности. В качестве основы для алгоритмов усвоения данных измерений используется подход на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряжённых уравнений [1].

В ходе работы таких алгоритмов усвоения данных порождаются как зависящие от модельного времени функции неопределенности (поправки к моделям адвекции-диффузии-реакции), так и операторы чувствительности. Исследуется возможность построения методами машинного обучения корректирующих модель операторов для региональных сценариев обратного моделирования. Полученные корректирующие операторы могут быть использованы для модификации базовой модели.

Получаемые в ходе решения обратных задач операторы чувствительности также могут быть использованы для уточнения решения. На их основе строятся операторы разрешения модели, которые позволяют оценить, как «истинный» источник искажается в результате его восстановления по имеющимся данным измерений. Операторы разрешения модели можно, в свою очередь, использовать для обучения нейросети убирать «артефакты» восстановления на заданном классе искомых источников [2]. Разработана модификация алгоритма для трёхмерной модели адвекции-диффузии-реакции и проведено его тестирование для сценариев идентификации источников для БПТ.

1. Penenko A.V., Penenko V.V., Tsvetova E.A. Data Assimilation Algorithms for Atmospheric Chemistry Models // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2025. vol. 61, № 3. pp. 378–39013 p.
2. Penenko A. et al. Hybrid Deep Learning and Sensitivity Operator-Based Algorithm for Identification of Localized Emission Sources // Mathematics. MDPI AG, 2024. vol. 12, № 1. p. 781 p.

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПЕРАТИВНОЙ КАРТЫ РИСКОВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ*

Ю. В. Пестова, О. А. Николайчук, А. Ю. Юрин, Н. О. Дородных
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
yupest@icc.ru

Лесные пожары в Иркутской области наносят значительный экологический и экономический ущерб. Существующие системы мониторинга лесных пожаров не обеспечивают прогнозирование рисков на основе единых методик и точных моделей машинного обучения, учитывающих индивидуальные географические особенности территории. Для решения данной проблемы в работе представлена информационная технология формирования оперативных карт рисков с использованием гибридной модели прогнозирования риска, нацеленная на снижение ущерба и смягчения последствий лесных пожаров. Разработанная информационная технология реализует этапы сбора, подготовки данных, прогнозирования риска лесных пожаров и визуализации результатов. Сбор и подготовка метеорологических данных осуществляется ежедневно автоматически с использованием продукта GFS, обеспечивающего прогнозирование метеорологических данных на 16 дней. Подготовка данных включает временну́ю агрегацию метеорологических показателей и пространственную интеграцию с данными о лесных кварталах, содержащих географические факторы (топографические, растительности, социальные), и предложенных кластерах лесничеств (4 кластера на территории Иркутской области), полученных на основе метода K-means, учитывающих схожесть влияния географических факторов на возникновение пожаров. Этап прогнозирования риска лесных пожаров на заданную пользователем территорию включает применение гибридной модели [2] машинного обучения, основанной на моделях Case-Based Reasoning, Random Forest, AutoML, где результат прогнозирования представлен как вероятность класса «пожар». Для кластера №1 результат прогноза формируется медианным голосованием трех моделей. Для кластеров №2 и №4 используется модель Random Forest, для кластера №3 – AutoML. Такое распределение моделей получено на основе исследования их точности по метрикам F1-score и Accuracy. Реализованная стратегия гибридной модели позволила уменьшить долю ошибочных прогнозов. Результатом модели для каждого лесного квартала территории является прогноз класса риска лесных пожаров (I–V), где класс I означает отсутствие опасности возникновения пожаров, а V – чрезвычайно высокую опасность. Класс риска лесных пожаров вычисляется на основе реклассификации вероятности класса «пожар» с интервалом 0.2. Реализация предложенной информационной технологии осуществлена на основе технологии wps-сервисов и языка программирования Python, в том числе модулей cfgrib, pandas, autogluon, multiprocessing, pywps, в виде

*Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

централизованного картографического сервиса, обеспечивающий регулярное обновление и доступность данных. Результатом работы сервиса является формирование векторных карт риска лесных пожаров на территории лесных кварталов.

1. Пестова Ю.В. Николайчук О.А., Сахарова М.И. Анализ риска лесных пожаров Иркутской области на основе методов машинного обучения//XVI Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: материалы конф. — Томск: ИМКЭС СО РАН, 2025. — С. 196–197.

К ВОПРОСУ О СТАБИЛИЗИРУЕМОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С ГИСТЕРЕЗИСОМ*

П. С. Петренко
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
petrenko_p@mail.ru

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений с процессом выметания [1] гистерезисного типа, моделируемого с помощью `play'-оператора ([2], [3]):

$$A(t)\dot{x}(t) = B(t)x(t) + C(t)y(t),\ t \in T = [0, +\infty), \quad (1)$$

$$-\dot{z}(t) \in N_{Q(t)}\big(z(t)\big), z(t) = \dot{y}(t), y(t_0) = y_0, z(t_0) = z_0 \in Q(t_0). \quad (2),$$

где $A(t), B(t), C(t) -$ заданные вещественные матрицы $R^n \times R^n$, при этом $det\, A(t) \equiv 0$; $x(t), y(t), z(t) \in R^n$, $Q(t) = x(t) - Z$ – "движущее множество", где Z – заданное замкнутое выпуклое множество из R^n, а $N_{Q(t)}$ – нормальный конус (в смысле выпуклого анализа) к замкнутому выпуклому множеству $Q(t)$ в точке $z(t)$. Под решением системы (1), (2) понимается тройка абсолютно непрерывных ($W^{1,1}$) функций $x(t), y(t), z(t) \in R^n$, удовлетворяющих (1), (2) для почти всех $t \in T$.

Системы в постановке (1), (2) возникают при моделировании различных физических процессов, в частности, при описании, так называемых, нерегулярных электрических схем (см. [3], [4]).

Анализ основывается на преобразовании уравнения (1), (2) к структурной форме с разделенными дифференциальной и алгебраической подсистемами [5]:

$$\dot{x_1}(t) = J_1(t)x_1(t) + H_0(t)y(t) + H_1(t)z(t), \quad (3)$$

$$x_2(t) = J_2(t)x_1(t) + G_0(t)y(t) + G_1(t)z(t), \quad (4)$$

$$-\dot{z}(t) \in N_{Q(t)}\big(z(t)\big), z(t) = \dot{y}(t), \quad (5)$$

где $J_1, J_2, H_0, H_1, G_0, G_1$ – некоторые матрицы соответствующих размеров, $(x_1(t), x_2(t)) = Q^{-1}x(t)$, Q – матрица перестановок. При этом множества решений систем (1), (2) и (3)-(5) совпадают.

Для рассматриваемого класса систем доказаны достаточные условия стабилизируемости.

1. Moreau J.-J. Evolution problem associated with a moving convex set in a Hilbert space \\ J. Differential Eq. 1977. Vol. 26. P. 347-374.
2. Brokate M., Sprekels J. Hysteresis and Phase Transitions \\ Ser. Appl. Math. Sci. Springer-Verlag, New York, vol. 121, 1996.
3. Petrenko P., Samsonyuk O., Staritsyn M. A note on Differential-Algebraic Systems with Impulsive and Hysteresis Phenomena // Cybernetics and Physics. 2020. Vol. 9, N 1. P. 51-56.
4. Adly S., Haddad T., Thibault L. Convex sweeping process in the framework of measure differential inclusions and evolution variational inequalities \\ Mathematical Programming B. Springer. 2014. Vol. 148, N 1. P. 5-47.
5. Щеглова А.А. Управляемость нелинейных алгебро-дифференциальных систем \\ Автоматика и телемеханика. 2008. Вып. 10. С. 57-80.

* Результаты получены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту ``Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями", N гос. регистрации: 121041300060-4.

ВЫЯВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ВОЗДУШНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В МЕСТАХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Д. А. Печерский, О. И. Бернгардт
Иркутский государственный университет
cdtt38.pecherskyd@yandex.ru

Введение. Задача анализа загрязненности является актуальной в вопросе решения проблемы загрязненности воздушного пространства. Точная локализация источников загрязнения позволяет ускорить и облегчить процессы его устранения или снижения его влияния окружающую среду. Одним из важных типов загрязнения является загрязнение воздушного пространства взвешенными частицами, к которым относят показатели «pm10» и «pm2.5». Негативное влияние данных частиц на организм человека доказано научно [1].

Определение источников загрязнения может решаться как с математической, так и с физической точки зрения большим количеством методов [2]. Большинство методов требуют специфических данных высокого качества и больших вычислительных мощностей. Вариантом, снижающим затраты на локализацию источников загрязнения, может быть метод, использующий в своей основе машинное обучение.

Задачей работы является проверка возможности использования методов машинного обучения для пространственной локализации источников загрязнения воздуха в местах городской застройки. В качестве модели нейронной сети был выбран автоэнкодер. В качестве данных, на которых будут обучаться модели нейронной сети, используются измерения показателей загрязненности воздуха датчиками, размещенными в различных местах городской застройки и доступными в открытом доступе. Контрольными данными для работы являются данные о загрязненности города Красноярск. Эти данные были выбраны, поскольку Красноярск является одним из промышленных центров Сибири, в котором проблема загрязнения воздуха стоит остро [3] и включает в себя как техногенные, так и антропогенные источники [4].

Метод. В данной работе представлен метод, основанный на использовании интерпретируемых нейронных сетей. В качестве модели нейронной сети используется автоэнкодер [5] и вариации его архитектуры. Это архитектура нейронной сети, которая состоит из двух нейронных сетей – энкодера и декодера (Рис. 1), между которыми находится слой с числом нейронов меньшей размерности, чем сами данные.

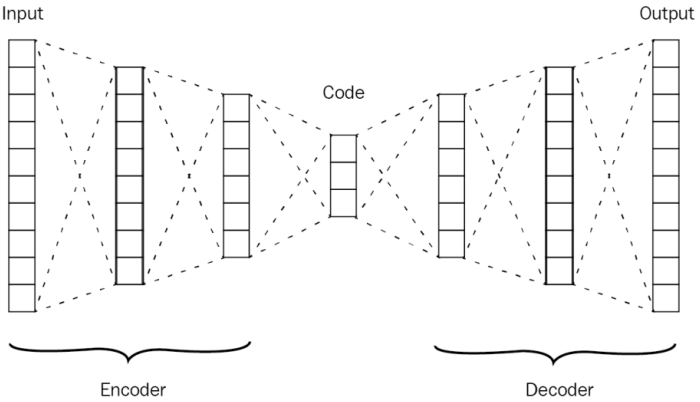


Рисунок 1. Архитектура автоэнкодера.

Использование такой архитектуры связано с предположением, что наблюдаемая динамика загрязнения на всех пунктах может быть описана сравнительно небольшим количеством источников и процессом распространения загрязнений от этих источников. Эта гипотеза позволяет представить показания каждого датчика в виде суперпозиции влияния различных источников. Архитектура автоэнкодера, а именно так называемое «бутылочное горлышко», позволяет уменьшить размерность входных данных, преобразуя лишь данные с точек-источников загрязнения. Архитектура энкодера определяется входными данными, а архитектура декодера выходными.

В качестве основного варианта архитектуры использовался полносвязный автоэнкодер, который получает на вход строку из n значений, где n – это количество пунктов в данных, сжимает их до m значений, притом m меньше n, и развертывает до изначальных n значений. В такой архитектуре входные и выходные данные имеют одинаковую размерность и не требуют предварительной разметки и деления на X и Y.

Для выявления пунктов мониторинга наиболее близких к источникам загрязнения требуется извлечь найденные закономерности и особенности в данных, найденные обученным автоэнкодером. Для этой задачи был выбран метод извлечения особенностей (feature importance), способный определить на какие значения в данных автоэнкодер опирается при их восстановлении. Самые важные для восстановления данных пункты и будут считаться регистрирующими основную динамику загрязнений в городе. В работе использовался перестановочный метод (permutation feature importance), определяющий наиболее важные входные переменные по тому, насколько сильно изменения их показаний влияют на результат прогноза.

Данные. Для анализа были выбраны данные с пунктов мониторинга основных показателей, которые находятся в общем доступе на ресурсе nebo.live. Обработка заключалась в удалении пустых данных. Были оставлены пункты, в которых регистрировались данные за период 21.06.2017 – 28.02.2022. Из данных был сформирован общий датасет, где каждый столбец соответствует пункту измерения, а каждая строка дате и времени. Для независимой оценки качества автоэнкодера и сравнения различных вариантов использовалось разделение на обучающий, валидационный и тестовый датасеты по методу последовательного разделения по времени, так как данные отображают временные изменения параметров загрязнения, и в пропорции 6:2:2, где 60% от всего датасета относится к обучающей выборке, а остальные 40% делятся поровну между валидационной и тестовой выборками.

Результаты. Оценки важности каждого пункта в результате прогноза приведены на рис. 2. На карте, изображенной на рисунках, цветами выделена важность пункта при восстановлении данных: красный – высокий уровень, зеленый – низкий, а желтый – значения между ними. В кружках указаны численный уровень важности до одного знака запятой – чем выше уровень, тем важнее данные с пункта для восстановления общей картины. Этот численный уровень – среднее значение функции потерь MAE, рассчитанной на прогнозах двух моделей: сверточного и полносвязного автоэнкодеров.

Из рис. 2 видно, что основной вклад в динамику PM2.5 вносят пункты 3, 4, 5, 6 ,7, 8, причем наиболее ярко выражено – Улица Копылова. Также выявленные пункты, сильно влияющие на восстановление данных по параметру PM2.5, соотносятся с предположением об их расположении в месте скопления производственных предприятий, что может свидетельствовать о качестве работы алгоритма. Важно учесть, что полученные результаты не могут быть однозначно и точно интерпретированы, поскольку в отличие от подобных исследований, за основу берутся не предполагаемые источники загрязнения, а доступные географические

пункты. На показания датчиков в этих пунктах могут сильно влиять их расположение и различные непрогнозируемые на настоящее время условия – например, воздушные потоки. Кроме того, в данной модели предполагается информация о локализации источников, от которых распространяются возмущения.

Эксперименты с архитектурой. Для выбора оптимальной архитектуры были проведены эксперименты с несколькими очевидными архитектуры и оценки качества их прогнозов. Первый вариант архитектуры – это полносвязный автоэнкодер. В такой архитектуре входные и выходные данные имеют одинаковую размерность и не требуют предварительной разметки и деления на входные параметры и метки. Также тестировались две вариации этой архитектуры: вариант с неотрицательными коэффициентами при обучении и вариант с неотрицательными коэффициентами и нулевым смещением. Эти варианты ставили ограничения на возможные значения внутренних весов нейронной сети.

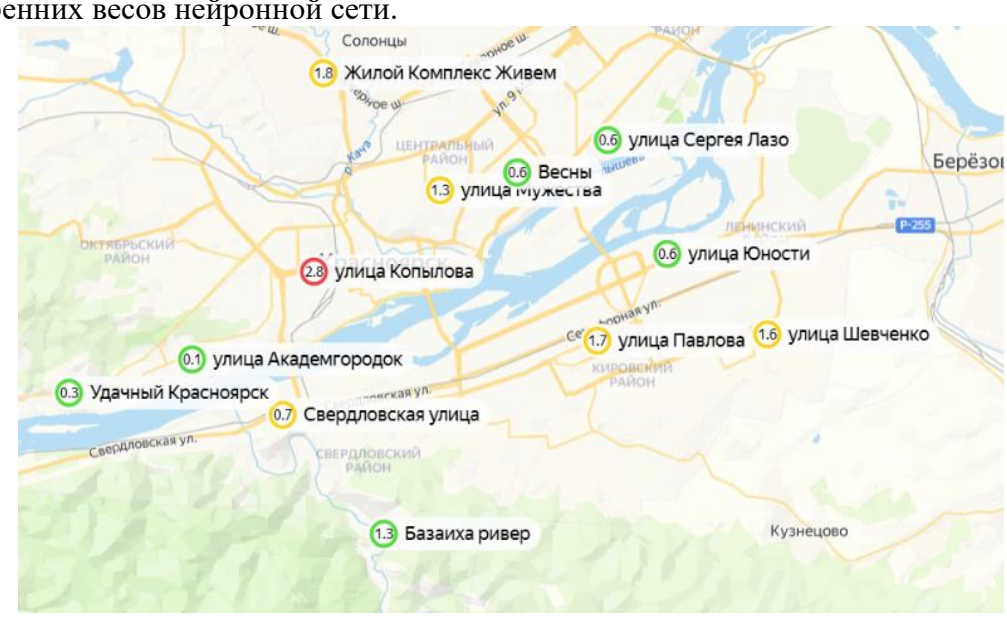


Рисунок 2. Карта извлеченных особенностей по параметру PM2.5.

Однако обычная полносвязная архитектура автоэнкодера не учитывает такой важный аспект данных, как их временную динамику. Так как загрязнение является воздушным, то и потоки воздуха могут перемещать их от пункта к пункту с течением времени, образуя закономерности, которые должна подмечать и использовать в восстановлении нашу модель. Таким образом, мы переходим от задачи обработки одномерных данных к задаче обработки двумерных данных.

Двумерные данные были построены следующим образом: n записей (где n — это число сэмплов датасета) были преобразованы в ряды от i до i+180, где 0<i<n-180. Число 180 выбрано неслучайно, так как каждая запись соответствует 1 минуте, следовательно, 180 записей содержат данные за период в условные 3 часа (условные, так как не учитываются строки с отсутствующими данными), а 3 часа являются достаточным временем для преодоления максимального расстояния на исследуемой площади ветром средней скорости.

После получения рядов значений нам нужно обучить автоэнкодер некоторой архитектуры восстанавливать, на основе истории значений из 180 записей, следующую, 181 запись. Из задачи следует, что архитектура декодера в сути не изменится, так как он все также восстанавливает одномерные данные, а вот архитектура энкодера должна позволить ему работать с двумерными данными.

Для этого было испытано 2 архитектуры: сверточная архитектура и lstm архитектура. Также для LSTM автоэнкодера были дополнительно протестированы 2 варианта его обучения: обучение на нормализованных данных и с помощью взвешенной среднеквадратичной ошибки в качестве функции потерь. Оба этих метода были призваны снизить влияние пунктов, которые демонстрировали стабильно высокие значения входных параметров (уровни загрязнения), на процесс восстановления данных и расчет функции потерь. Нормализация данных проводилась до нулевого среднего и единичной дисперсии, благодаря чему нейронная сеть в первую очередь фиксировала разброс изменения данных на пунктах. Взвешенная среднеквадратичная ошибка — это подход, подразумевающий не изменение входных данных, а лишь коррекцию функции потерь, когда каждому пункту ставится в соответствовие свой «вес», обратно пропорциональный величине среднего значения данных по этому пункту. Таким образом, оба варианта снижали высокие и повышали низкие значения параметров загрязнения и в принципе близки.

После обучения всех вышеперечисленных архитектур автоэнкодера на основе метрик качества MAE и MSE были выявлены 2 лучших варианта: обычный автоэнкодер и сверточный автоэнкодер.

Энкодер полносвязного автоэнкодера состоит из 4 слоев: входного слоя на 12 нейронов, выходного на 5 и 3 промежуточных на 80, 100 и 80 нейронов соответственно. Декодер наоборот: 5 на входе, 12 на выходе и также, 3 слоя на 260 нейронов в сумме. Функции активации на внутренних слоях — «relu», а на выходных – линейная функция.

Сверточный автоэнкодер содержит такой же декодер, что и полносвязный, а энкодер имеет два сверточных слоя с функцией активации «relu» формирующих данные размерностью 179x11x32 и 178x10x16 соответственно, а также 2 полносвязных слоя на 100 и 80 нейронов. Размерность «бутолочного горлышка» сверточного автоэнкодера также составляет 5, а функции активации на выходных слоях декодера и энкодера являются линейными функциями.

Остальные архитектуры автоэнкодера и их варианты обучения имели большее значение функции потерь и поэтому не учитывались.

Заключение. В работе предложен и апробирован метод определения пунктов наблюдений, наиболее сильно влияющих на остальные пункты по данным рядов наблюдений на сети пространственно-разнесенных пунктов. Метод основан на построении автоэнкодера с числом входов соответствующих числу пунктов в сети наблюдений, и выявлению наиболее важных входов методом Feature Importance. По результатам работы данный алгоритм способен выявлять наиболее активные пункты динамики воздушного загрязнения на основе датасета относительно небольшого размера и с ограниченными ресурсами. Выявленные источники соотносятся с реальными данными о расположении производственных предприятий и движении воздушных потоков, однако могут интерпретироваться различными способами и требуют более детального исследования.

1. World Health Organization et al. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2. 5 and PM10) //Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. – 2021. – Т. 1302.
2. Hopke, P. K. Review of receptor modeling methods for source apportionment // Journal of the Air & Waste Management Association, 2016 66(3), 237–259. URL: https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1140693 (дата обращения 13.02.2025)
3. Клюев, Н. Н. "Грязные" города России: факторы, определяющие загрязнение атмосферного воздуха // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2018. – Т. 26, № 2. – С. 237-250.

4. Бадмаева С. Э., Циммерман В. И. Антропогенное загрязнение атмосферного воздуха городов Красноярского края // Вестник КрасГАУ. 2015. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/antropogennoe-zagryaznenie-atmosfernogo-vozduha-gorodov-krasnoyarskogo-kraya (дата обращения: 12.02.2025).
5. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning Internal Representations by Error Propagation // Parallel Distributed Processing vol. 1. 1986. pp. 318-362.

КОНЦЕПЦИЯ ПОДХОДА ОТВЕТОВ НА ВОПРОСЫ ПО ТАБЛИЧНЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ СЖАТОГО СЕМАНТИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТАБЛИЦ*

И. А. Поддубный
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
poddubnyyiv@yandex.ru

На сегодняшний день таблицы широко используются при организации, представлении и хранении данных. Однако, как правило, они обладают разной компоновкой и не сопровождаются явной семантикой, необходимой для машинной интерпретации своего содержания. Недавние исследования показали большой прогресс в решении различных задач в области автоматического понимания табличной информации, в частности, в области, которая фокусируется на автоматическом ответе на вопросы, используя данные, представленные в табличной форме (Table Question Answering – TQA) [1]. Это направление стремится развить системы, способные извлекать и интерпретировать информацию из таблиц, чтобы ответить на поставленные вопросы точно и эффективно. Несмотря на это, до сих пор существует потребность в разработке более эффективных решений, применимых на практике.

Ранее автором был предложен подход к решению задачи TQA, основанный на предварительном обучении языковой модели BART для генерации вычислительных графов SQL-запросов [2]. Эксперименты показали, что модель достигает высокой точности на тестовой выборке наборов данных WikiSQL и SQUALL после тонкой настройки, превосходя базовые решения, в частности, TAPEX [3]. Однако подход оказался не эффективным при переходе с SQL на NL из за сильной связи между SQL запросом и используемыми в ответе функциям.

После анализа работ представленных на ACL 2025, была предложена новая концепция подхода к решению задачи TQA, нацеленная на исправления недостатков предыдущего подхода и расширение практического применения решений данной области за счет смены формата представления входных и выходных данных. Основное нововведение — это замена стандартного линеаризованного представления таблицы на структурированную строку заголовков с семантическим описанием (типами и другими метаданными), которое в стандартном представлении содержится в элементах таблицы. Такой подход позволит повысить качество вывода, обогатить запросы смысловой разметкой и уменьшить место занимаемое таблицей. При этом станет возможна обработка таблиц с любым количеством строк (ограничения только в количестве столбцов и детальности их семантики). Также подход позволит модели лучше улавливать связь между ключевыми полями вопроса и заголовками таблицы.

1. Jin N., Siebert J., Li D., Chen Q. “A survey on table question answering: recent advances”. In China Conference on Knowledge Graph and Semantic Computing. Springer, 2022, P. 174–186. DOI: 10.1007/978-981-19-7596-7_14.
2. Poddubnyi I.A., Dorodnykh N.O. “Query Plan Generation for Table Question Answering”. In: Proceedings of the VLDB 2025 Workshop: Tabular Data Analysis (TaDA’25), 2025, P. 1-7.
3. Liu Q., Chen B., Guo J., Ziyadi M., Lin Z., Chen W., Lou J.-G. “TAPEX: Table pre-training via learning a neural SQL executor”. In: Proceedings of the 10th International Conference on Learning Representations (ICLR’22), 2022, P. 1–19.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9).

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР «МГР-02-16G»*

В. И. Поливач, М. Л. Лемницкий, С. Ю. Малышков
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
polivach@imces.ru

Многоканальный геофизический регистратор «МГР-02-16G», предназначен для измерения временных и пространственных вариаций параметров магнитной составляющей естественного импульсного электромагнитного поля Земли [1] (ЕИЭМПЗ).



В качестве параметров ЕИЭМПЗ «МГР-02-16G» регистрирует:
количество импульсов магнитной составляющей поля за выбранный интервал времени, амплитуда которых превысила заданный порог;
амплитуду импульсов магнитной составляющей;
регистратор имеет встроенный GPS навигатор для позиционирования каждой точки измерения.

Регистратор предназначен для:

- инженерных изысканий, мониторинга геодинамических движений и напряженно-деформированного состояния земной коры;
- изучения глубинного строения земной коры, обнаружения в земной коре скрытых геологических разломов, разрывных нарушений, геофизической разведки;
- оценки сейсмической ситуации на сейсмоактивных территориях.

Регистратор может использоваться для проведения фундаментальных исследований в разделе Наук о Земле [2], в разработке систем оперативного прогноза землетрясений [3], при исследовании кинетики и механики криогенных процессов [4]. В соответствии с условиями научного сопровождения с ООО «Газпром трансгаз Чайковский», продолжены работы по оценке устойчивости оползневого склона на трассе магистрального газопровода (МГ) «Уренгой-Помары-Ужгород» методом ЕИЭМПЗ. В настоящее время аналогичные системы устанавливаются на других объектах ПАО «Газпром» (Армения, Южная Осетия, Дагестан, Камчатка).

1. Воробьев А.А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Геология и геофизика. – 1970. – № 12. – С. 3–13.
2. Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Крутиков В. А., Поливач В. И., Шталин С. Г. и др. Развитие пассивной радиоволновой информационно-измерительной технологии мониторинга динамических процессов взаимодействия литосферы, криосферы и атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. – № 02. – С. 105–109. DOI: 10.15372/AOO20220204.
3. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР. – 1991. – 219 с.
4. Малышков С. Ю., Гордеев В. Ф., Поливач В. И. Полевые исследования динамики техногенного оползня // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 2. – С. 82–90.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. Авторы доклада искренне благодарны сотрудникам института, участвующих в создании МГР-02-16, Шталину С.Г., Зуеву А.В., Гордееву В.Ф.

ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ДАННЫХ КАРДИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А. Л. Половьян[1], С. Г. Куклин[2], О. А. Иванова[2], А. С. Аникин[3]
[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет,
[2]ИГМАПО – филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО МЗ РФ,
[3]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
anikin@icc.ru

Кардиологические исследования в последние годы приобрели в России особую значимость. Правительством РФ поставлена задача радикального снижения смертности от болезней системы кровообращения. Созданы национальный проект «Здравоохранение» и утверждена региональная программа «Борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями». Разработаны системы показателей качества исполнения и выделяются значительные финансовые средства. Задачи формирования репрезентативных кардиологических баз данных поставлены во многих организациях, как в России, так и за рубежом (см., напр., [1]). Но в силу выраженной региональной специфики указанных заболеваний, помимо создания общероссийских информационных баз совершенно необходимо вкладывать усилия также в развитие регионально ориентированных коллекций данных. Но одним из основных препятствий к успешной реализации этих больших задач является, на наш взгляд, относительная слабость региональных баз данных, как пациентов, так и практически здоровых лиц с факторами риска сердечно-сосудистых заболеваний, особенно у лиц молодого возраста.

Выполняемые нами исследования до настоящего времени опирались только на небольшой набор данных пациентов, что, несомненно, сужало наши возможности (см. [2, 3]). В 2024 году совместно с коллегами была достигнута договоренность о создании региональной базы данных кардиоинтервалограмм у студенческой молодежи на основе данных мониторинга сердечного ритма в условиях ряда общеизвестных нагрузочных проб. Заметим, что вычислительные и инструментальные средства работы с базой нами уже успешно разрабатываются (см. [4, 5]).

В качестве обследуемых для создания базы были выбраны студенты ИрНИТУ и ИГУ, давшие согласие на участие в этой работе. В настоящее время в состав базы включены более 50 временных рядов кардиоинтервалов, планируется существенное расширение числа участников проекта. Результаты работы над нашей информационной базой докладывались на III Байкальском медицинском форуме «Здоровая Сибирь» 24 июня 2025 года и получили высокую оценку сообщества специалистов.

1. Российское общество холтеровского мониторирования и неинвазивной диагностики. Тестовая база длительных ЭКГ. http://rohmine.org/baza-dannykh-rokhmine/testovaya-baza-standart-ekg-2018-g/
2. Шелехова Ю.В., Храмцова Н.А., Онучина Е.В., Куклин С.Г. Динамики вариабельности сердечного ритма у мужчин работоспособного возраста, страдающих язвенной болезнью желудка и двенадцатиперстной кишки, ассоциированной и неассоциированной с инфекцией Helicobacter Pylori // ЭНИ Забайкальский мед. вестник. 2015, № 2. С. 13–16.
3. Ivanova O., Kuklin S., Titova A. Prognosis of long-term physical exercises efficacy in hypertonic patients // Journal of Hypertension. V. 35, e-Suppl. 2, September 2017. P. 215.
4. Куклин С.Г., Аникин А.С. Интерактивная технология анализа данных холтеровского мониторирования // Ляпуновские чтения, 2023. С. 53–54.
5. Куклин С.Г., Аникин А.С., Горнов А.Ю. Графический пользовательский интерфейс для задачи анализа данных холтеровского мониторирования // Ляпуновские чтения, 2024. С. 126.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛЕСОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

А. К. Попова
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
chudnenko@icc.ru

Лесные экосистемы подвергаются комплексному воздействию разнообразных природных и антропогенных нарушений, что приводит к их деградации и утрате. Эти множественные, зачастую каскадные нарушения оказывают значительное влияние на структуру, видовой состав и функциональные характеристики лесных экосистем. Следствием этого является угроза устойчивому предоставлению экосистемных услуг как на локальном и ландшафтном, так и на глобальном уровнях. Поэтому прогнозирование состояния лесных экосистем становится необходимым условием для разработки стратегий устойчивого управления лесными ресурсами.

Эффективным инструментом для решения данной задачи выступает моделирование динамики лесов. Модели лесных ландшафтов позволяют разрабатывать и оценивать различные сценарии лесопользования, имитировать запланированные хозяйственные воздействия и получать прогнозные данные о динамике древостоев. Результатом их применения является количественная оценка долгосрочных экологических и экономических последствий различных вариантов управления. Получение репрезентативных данных о спектре потенциальных воздействий на лесные ландшафты и их масштабных экологических последствиях является критически важным для стратегического планирования и управления, особенно в регионах с высокой лесистостью.

Климатические факторы играют ключевую роль в формировании лесного биома. Нарушения, индуцированные как естественными процессами, так и антропогенной деятельностью, характеризуются сложностью и взаимосвязью. Чувствительность лесов к климатическим изменениям достаточно хорошо изучена в аспектах пространственного распределения, агрегации биомассы и ряда косвенных эффектов [1, 2]. Однако прямое влияние изменений климата на нарушения лесов остается недостаточно исследованным. Колебания температур, режим осадков и концентрации CO_2 в атмосфере оказывают непосредственное воздействие на чистую первичную продукцию и запасы углерода в региональных лесах. Поскольку климатические изменения способны влиять на масштабы и направление сукцессионных смен растительности, интеграция климатических прогнозов в модели динамики лесных ресурсов представляется обязательным элементом современных исследований.

Для прогнозирования динамики лесов в данном исследовании использована модель LANDIS-II (Landscape Disturbance and Succession Model) [3], предназначенная для симуляции долгосрочных процессов в лесных экосистемах. Она включает в себя основной модуль, координирующий взаимодействие компонентов, и библиотеку расширений, обеспечивающих имитацию различных экосистемных процессов на уровне насаждений и ландшафтов (сукцессия, пожары, ветровалы, рубки, вспышки насекомых-вредителей).

В основе модели LANDIS-II лежит представление ландшафта в виде сетки взаимодействующих ячеек. Каждая ячейка характеризуется наличием когорт деревьев определенной породы и возраста. На уровне ячейки моделируется конкуренция между видами за такие ресурсы, как свет, почвенная влага и пространство. Внутри участков процессы соответствуют уровню древостоя, в то время как ландшафтные

процессы, такие как распространение семян или крупномасштабные нарушения, моделируются как взаимодействие между соседними ячейками.

Добавление данных социально-экономических сценариев (SSP, Shared Socio-Economic Pathways) позволило смоделировать разные варианты климата в будущем. Были выбраны сценарии SSP1-2.6 (устойчивость, слабые изменения) и SSP5-8.5 (экстремальные изменение, значительное увеличение концентрации парниковых газов). Предварительно были проанализированы исторические данные шести моделей CMIP6 для территории области исследования. На основе анализа была выбрана климатическая модель MRI-ESM2-0, прогнозные данные которой использовались для моделирования динамики лесов на 250 лет. При расчетах учитывалась динамика с помощью расширения Biomass Succession, возникновение пожаров и смертность деревьев в результате повреждения уссурийским полиграфом.

Полученные результаты показали наличие значимых различий в площади и биомассе лесов в разных сценариях будущего климата. Заметнее всего отличается изменение биомассы пихты из-за учета повреждения уссурийским полиграфом, т.к. потепление климата в сценарии SSP5-8.5 ускоряет размножение этого вредителя. В дальнейшем требуется провести сравнение с историческим сценарием климата и добавить в модель учет рубок.

1. Wu Z. et al. Future forest dynamics under climate change, land use change, and harvest in subtropical forests in Southern China. Landscape Ecology. Springer Netherlands, 2019. Vol. 34, № 4. P. 843–863.
2. Olson S.K. et al. Landscape-Scale Forest Reorganization Following Insect Invasion and Harvest Under Future Climate Change Scenarios. Ecosystems. Springer US, 2021. Vol. 24, № 7. P. 1756–1774.
3. Scheller R.M. et al. Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolutionю Ecological Modelling. 2007. Vol. 201, № 3–4. P. 409–419.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ВЫБРОСАМИ ПРОМПРЕДПРИЯТИЙ ПО ДАННЫМ ТОЧЕЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ*

А. С. Поснова[1], Т. В. Ярославцева[1, 2, 3]
[1]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
[2]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН,
[3]Новосибирский НИИ гигиены Роспотребнадзора,
tani-ta@list.ru

В условиях ухудшающейся экологии в промышленных городах, важно эффективно оценивать вредное влияние от промышленных объектов. Представляется целесообразным применять подходы, позволяющие на основе ограниченного числа точечных измерений концентрации загрязняющих примесей и сведений о размещении промпредприятий, получать численные оценки уровней загрязнения в произвольных точках города, а также выявлять зоны превышения предельно допустимых норм содержания поллютантов [1].

В работе представлены результаты разработки программного средства для оценки загрязнения воздуха в промышленных городах, включая интеграцию экспериментальных данных, реализацию алгоритма расчета загрязнений и визуализацию результатов.

Задачи:

- Разработка алгоритма взаимодействия пользователя с программным средством, составление карты навигации и макетов интерфейсных окон.
- Интеграция данных экспериментальных исследований в информационную систему (разработка базы данных).
- Разработка и реализация алгоритма расчета полей загрязнения с использованием математической модели оценивания [2].
- Визуализация и экспорт результатов расчета полей загрязнения территории города.
- Проведение тестирования программного продукта на данных экспериментальных биомониторинговых исследований в г. Иркутск и г. Красноярск (накопленное содержание тяжелых металлов в листьях деревьев) [3].

Используемые программные технологии: Программное средство реализовано на языке программирования C# и платформе WPF. Для хранения данных используется база данных SQLite с ORM Entity Framework.Core. Визуализация результатов расчета проводится с использованием картографического сервиса OpenStreetMap.

Разработка имеет практико-ориентированное значение. Её применение позволит повысить экономичность численных оценок воздействия промышленных выбросов на экологическую ситуацию и эффективно планировать мероприятия по улучшению экологии городской среды.

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № 075-15-2024-533.

2. Рапута В.Ф. Модели реконструкции полей длительных выпадений аэрозольных примесей // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 506-511.
3. Юсупов Д.В., Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Ялалтдинова А.Р. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 6. С. 25-36.

МНОГОЦЕЛЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕКЦИОННОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ УСАДКИ И ИСКРИВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MOLDFLOW И ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА

Пэ Чхоль Ун, Сон Чхон Ир, Чон Кун Хек, Ян Вон Чхор, Пак Ил Бем
Факультет науки и технологии материалов,
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
ywch71912@star-co.net.kp

Мы исследовали суставную крышку — одну из пластиковых запчастей стоматологических комплексных лечебных станков, используемых в медицинской области (рис.1).



Рисунок 1. Суставная крышка стоматологического комплексного лечебного станка

Суставная крышка была изготовлена из термопластичного пластика ABS. Ее вес составляет 70.95 g, а размер оболочки составляет 67×152×95 mm.

В этом исследовании Moldflow использовалась для численного моделирования инжекционного процесса элюирования смол.

На рис. 2 показана модель продукта суставной крышки с системой разливки.

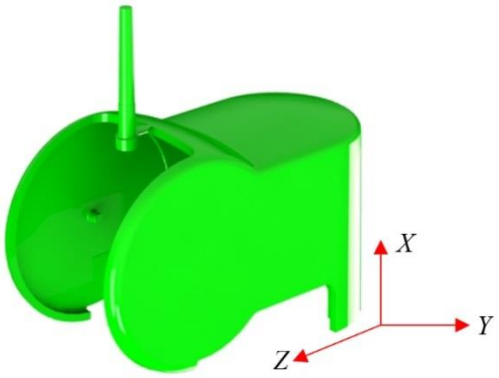


Рисунок 2. Модель продукта суставной крышки с системой разливки

Выбраны параметры инжекционного процесса для оптимизации процесса на основе численного моделирования: температура плавления, температура штампа, скорости впрыска, давление набивки и время набивки. Когда температура плавления смолы ABS 55 ниже 200°C, скорость сдвига превышает максимальную скорость сдвига с использованием конструированной системы разливки, поэтому при моделировании был установлен диапазон температуры плавления на 200-260 °C. Кроме того, поскольку объем впрыска составляет 70 см^3, скорость впрыска была установлена на 35-75 см^3/с, чтобы время впрыска составляло от 1 до 3 с. А на основе

рекомендованных значений давление набивки было установлено на 60-100 % максимального давления впрыска и время набивки было установлено на 20-60 с, поскольку время естественного охлаждения во время процесса инжекции суставной крышки составляет примерно 61 с.

Проведено моделирование с помощью ортонормированной ортогональной таблицы $L_{25}(5^6)$ на основе установленных параметров и диапазонов значений процесса.

Для четырех характеристической величины, влияющих на искривление продуктов инжекции (коэффициент усадки, *X*- искривление, *Y*- искривление, *Z*-направленное искривление), вычисляется отношение S/N с использованием уравнения (1) [1] и нормализуется с помощью уравнения (2) [2].

$$sn_{ij} = -10\log(y_{ij}^2), i = \overline{1,N},\ j = \overline{1,R} \tag{1}$$

$$ssn_{ij} = \sqrt{\frac{N}{N-1}}\frac{\left(sn_{ij} - \overline{sn}_j\right)}{V_j}, i = \overline{1,N},\ j = \overline{1,R} \tag{2}$$

$$\overline{sn_j} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} sn_{ij},\ j = \overline{1,R} \tag{3}$$

$$V_j = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} sn_{ij}^2 - \overline{sn}_j^2} \tag{4},$$

где i — номер эксперимента, j — номер характеристической величины, N — количество экспериментов, R — количество характеристических величин, y_{ij} — j-я характеристическая величина в i-ом эксперименте, $\overline{sn_j}$ и V_j — среднее значение и дисперсия отношений S/N j-ой характеристической величины.

Поскольку 4 характеристической величины влияют на качество инжекционных продукций, влияние параметров процесса анализировали с помощью метода Taguchi многоцелевой характеристики. Для этого была установлена многоцелевая характеристическая величина $K = (K_1, K_2, K_3, K_4)$ из всех характеристических величин (коэффициент усадки K_1, *X*-направленное искривление K_2, *Y*-направленное искривление K_3, *Z*-направленное искривление K_4).

При инжекционном формовании суставной крышки происходит искривление в направлениях *X*, *Y*, и *Z*, а если увеличается искривление в направлении *Y*, где происходит сборка, то увеличается зажимное усилие суставной крышкой, из-за этого не может обеспечить свободное движение сопрягаемой детали и возникать задиры на поверхности соединений, которые могут быть получены на поверхности сопрягаемой детали.

Поэтому следует разумно выбрать параметры процесса, чтобы минимизировать объемную усадку и *Y*-направленное искривление.

Следовательно, рассчитывалась эффективность параметров процесса для K_1, K_2, K_3 и K_4 с помощью уравнения (5).

$$E_{ij}^{(k)} = \sum_{x_{mi}=j} ssn_{mk}, i = \overline{1,S},\ j = \overline{1,P}, k = \overline{1,R} \tag{5},$$

где S — количество параметров процесса (6), p — количество уровней (5), x_{mi} — уровень i-ого параметра процесса в m-ом эксперименте.

Из-за важности вышеуказанных характеристических величин весовые векторы для параметров K_1, K_2, K_3 и K_4 были установлены как (0,4, 0,1, 0,4, 0,1) и вычислен весовой эффект W следующим образом:

$$W_{ij} = 0.4E_{ij}^{(1)} + 0.1E_{ij}^{(2)} + 0.4E_{ij}^{(3)} + 0.1E_{ij}^{(4)}, i = \overline{1,S}, j = \overline{1,P} \quad (6)$$

Рациональные параметры процесса, которые максимизируют *W*, составляют $A_2B_1C_3D_5E_5$.

Был проведен эксперимент для проверки точности результатов численных моделирования. В эксперименте была предсказана точность моделирования оптимизации путем анализа погрешности со сравнением искривлений продуктов инжекционного формования до и после оптимизации.

Была построена процедура тестирования на основе значений оптимальных параметров процесса. При тестировании инжекционного процесса была проверена точность результата оптимизации путем сравнительного анализа размеров искривлений в направлениях *X*, *Y* и *Z* до и после оптимизации. На Рис.3 показан результат сравнения размера *Y*-направленных искривлений до и после оптимизации.



Рисунок 3. Сравнение размера искривлений в *Y*-направлении до и после оптимизации

После оптимизации значение искривления в *Y*-направлении значительно уменьшилось по сравнению с направлениями *X* и *Z*, т.е. уменьшилось 61,2 % (1,78 mm) до оптимизации.

Предложение. Был разработан метод оптимизации процесса с использованием Moldflow и дисперсионного анализа, чтобы обеспечить уменьшение коэффициента усадки и искривления в целевом направлении с равномерным уменьшением искривления в другом направлении в инжекционном процессе пластиковых запчастей, которые незакрытые, следовательно, может подвергаться влиянию от искривления по характеристике структуры продукции.

1. Mahmoud A. Barghash, Faisal Alkhannan. Shrinkage and Warpage Detailed Analysis and Optimization for the Injection Molding Process Using Multistage Experimental Design. Quality Engineering, 2014, 16: 319-334.
2. Z ivorad R. Lazic. Design of Experiments in Chemical Engineering. WILEY-VCH, British, 2004, Part I 1-156.

СРАВНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ НА ЗАДАЧЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ТАБЛИЧНЫХ ДАННЫХ*

А. А. Ракишев, А. Е. Хмельнов, А. О. Шигаров
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
rakishev536@gmail.com, shigarov@icc.ru

Сегодня большие языковые модели (LLMs) повсеместно применяются в различных задачах, связанных с обработкой текстовой и документной информации. Одним из направлений их применения стала трансформация табличных данных [1-2]. Пользовательский промпт к такой модели может быть запросом на трансформацию конкретной таблицы к некоторой целевой форме. При этом вместо спецификации исходной и целевой формы можно использовать примеры входных и выходных данных. Пользовательский промпт может запросить как выполнение трансформации непосредственно самой моделью (LLM), так и генерацию исходного кода программы, предназначенной для выполнения трансформации.

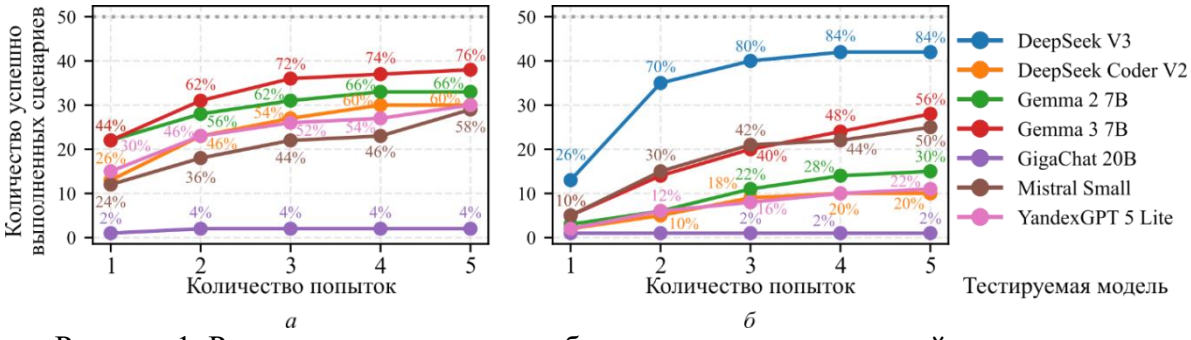
Использование примеров входных и выходных данных в пользовательских промптах делает применение LLM к данной задаче схожим с более традиционными методиками трансформации табличных данных на основе программирования по примерам [3]. Это делает возможным применение существующих тестов производительности, которые ранее использовались для оценки тех традиционных методик, также и для количественного сравнения больших языковых моделей на задаче трансформации табличных данных. Наиболее полным из существующих тестов производительности является Foofah [3], тест, разработанный в Мичиганском университете в 2017 году. Он включает 50 тестовых задач (сценариев) трансформации табличных данных, каждая из которых состоит из пяти однотипных вариантов задачи таких, что все пять могут быть обработаны одним алгоритмом. Каждый вариант задачи сопровождается собственным примером входа-выхода трансформации данных, тестовой таблицей и эталонной целевой таблицей.

В работе представлено количественное сравнение семи современных LLM на всех 50 сценариях трансформации табличных данных из тестовой коллекции Foofah. Модели тестировались в двух режимах: в первом они применялись напрямую к данным; во втором они генерировали Python-скрипты для трансформации табличных данных, которые затем выполнялись. Целевые таблицы, полученные в результате как прямого применения LLM, так и посредством выполнения программ, сгенерированных с помощью LLM, сопоставлялись с соответствующими эталонными данными коллекции Foofah. Тестовая задача (сценарий) считалась успешно выполненной, только в том случае, если для всех ее вариантов полученные целевые таблицы были абсолютно идентичны эталонным данным. При этом на выполнение каждого сценария дается пять попыток таким образом, что в первой попытке промпт включает пример входа-выхода трансформации данных из первого варианта тестовой задачи; если первая попытка не была успешной, то делается вторая попытка, но уже с промптом, включающим пример из второго варианта, и т. д. Следует отметить, что сами варианты тестовой задачи сформированы так, что в каждом последующем из

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

них дается более подробный пример входа-выхода трансформации данных. Поэтому доля корректных ответов от LLM возрастает с числом попыток, в которых даются все более и более подробные примеры. Сопоставление выполнялось автоматически с помощью разработанного нами теста производительности на основе коллекции Foofah. Полученные результаты тестирования показаны на Рисунке 1.

Анализ результатов выявил, что все модели, которые тестировались в двух режимах, работают лучше в режиме их прямого применения к данным, чем в режиме генерации программ. Лучшие результаты показала модель DeepSeek v3, которая тестировалась только в режиме генерации программ, посредством которых удалось успешно выполнить 84 % тестовых задач коллекции Foofah. (На момент тестирования модель DeepSeek v3 еще не была доступна для локальной установки, что не позволило протестировать ее в режиме прямого применения.) Несмотря на то, что в первом режиме модели в основном показали свои лучшие результаты по сравнению со вторым режимом, ни одна из них не справилась с обработкой «больших» таблиц одного сценария (поименованного как «exp0_41»), имеющих от 127 до 163 записей в целевой форме. Можно утверждать, что именно второй режим является наиболее приемлемым в общем случае, поскольку он не ограничивает размер табличных данных. Тем не менее прямое применение LLM может быть полезно в случаях обработки «небольших» таблиц.



а *б*

Рисунок 1. Результаты тестирования больших языковых моделей на коллекции тестовых задач (сценариев) трансформации табличных данных Foofah: результаты прямого применения LLM к данным (*а*); результаты, полученные посредством выполнения программ, сгенерированных с помощью LLM (*б*).

Таким образом, для построения эффективных и надежных ИИ-ассистентов трансформации табличных данных рекомендуется использовать LLM именно как генератор исходного кода. При этом можно использовать модели, показывающие лучшие результаты в данном режиме, такие как DeepSeek V3. Перспективы развития данного исследования связаны с изучением применимости LLM к генерации исходного кода программ трансформации табличных данных не только на языках общего назначения (Python, C и др.), но и на проблемно-ориентированных языках (CRL [4], RTL [5], TableCanoniser [6] и др.), предназначенных именно для трансформации табличных данных.

1. Akella A., Narayanam K. Data wrangling task automation using code-generating language models // Proc. 39th AAAI Conf. on Artificial Intelligence. 2025. V. 39. A. 3446.
2. Zhou Y., Cai X., Shi Q., Huang Y., Li H., Qu H., Weng D., Wu Y. Xavier: Toward better coding assistance in authoring tabular data wrangling scripts // Proc. 2025 CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. 2025. A. 850.
3. Jin Z., Anderson M. R., Cafarella M., Jagadish H. V. Foofah: transforming data by example // In Proc. 2017 ACM Int. Conf. on Management of Data. 2017. P. 683–698.

4. Шигаров А.О. Извлечение реляционных данных из произвольных таблиц электронных документов редактируемых форматов на основе пользовательских правил // Вычислительные технологии. 2025. Т. 30, № 3. С. 127–144.
5. Shigarov A. Regular table language for data extraction from document tables accessible in machine-readable formats // Lobachevskii J. Math. 2025. V. 46, N. 4, P. 1495–1510.
6. Xiong K., Huang C., Wybrow M., Wu Y. TableCanoniser: Interactive grammar-powered transformation of messy, non-relational tables to canonical tables // Proc. 2025 CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. 2025. A. 849.

ОЦЕНИВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЫМОВЫХ ВЫБРОСОВ ТЭЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ*

В. Ф. Рапута[1], А. А. Леженин[1], Р. А. Кузьминых[1, 2]
[1]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
[2]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН,
raputa@sscc.ru

Для численного моделирования процессов подъёма дымовых смесей из труб промышленных предприятий могут быть использованы уравнения гидротермодинамики. При нейтральной стратификации атмосферы они допускают представление решений в аналитической форме [1], что с использованием спутниковой и аэрологической информации существенно упрощает оценивание динамических и тепловых характеристик исходящих дымовых смесей. Скорость подъёма дымовой струи $w(z)$ описывается соотношением [1, 2]

$$w_m^3(z) = \frac{w_0^3 R_0^3}{c^3} + \frac{3gQ_T}{2\pi T_a c^2}\left(\frac{1}{z} - \frac{R_0^2}{c^2 z^3}\right) \quad , \qquad (1),$$

где w_0 - скорость выхода дымовой смеси из устья трубы (м/с), R_0 – радиус трубы (м), T_a – температура воздуха (°K), $Q_T = \pi R_0^2 \; w_0 \; \Delta T$, ΔT – перегрев смеси относительно T_a, g – ускорение свободного падения (м/с^2), c – константа, определяемая начальной конфигурацией дымового шлейфа.

При наличии информации о скорости подъёма дымового шлейфа соотношение (1) позволяет оценить величины w_0 и ΔT. Эти характеристики определяют дополнительную высоту подъёма газовоздушной смеси в атмосфере, что в конечном итоге приводит к улучшению рассеивания вредных примесей.

Для проведения исследований использовались спутниковые снимки территорий, прилегающих к Гусиноозерской ГРЭС и Ново-Иркутской ТЭЦ, данные аэрологического зондирования. Поля ветра и температуры в атмосфере рассчитывались по гидродинамической модели WRF [3], что позволило получить их детальное пространственно-временное распределение в районах расположения объектов теплоэнергетики. С применением соотношений, вытекающих из теории подобия и размерности, обсуждаются методы оценивания траекторий и скоростей подъёма дымовых выбросов от высотных труб рассматриваемых тепловых станций по спутниковым снимкам и результатам моделирования атмосферных циркуляций [4]. В определённых диапазонах расстояний от труб ТЭЦ установлена адекватность представления траекторий подъёма шлейфов, выполнены оценки скоростей исходящих дымовых смесей.

Полученные результаты позволяют определять характеристики активной стадии подъёма дымовых шлейфов, выполнять оперативный контроль режимов выбросов примесей от высотных труб.

1. Priestley C.H.B., Ball F.K. Continuous convection from an isolated source of heat // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1956. V. 81. P. 144-157.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № 075-15-2024-533.

2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
3. Weather Research and Forecasting (WRF) Model. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model.
4. Кузьминых Р.А., Рапута В.Ф., Леженин А.А., Градов В.С. Оценивание скоростей подъёма дымовых шлейфов от труб ТЭЦ по спутниковым снимкам // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 08. С. 652-658.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnO, ПРИГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПИРОЛИЗА РАСПЫЛЕНИЕМ

Ри Юн Сик, Ким Сон Чхор, Ян Вон Чхор
Факультет науки и технологии материалов,
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
ywch71912@star-co.net.kp

Прозрачные проводящие оксидные пленки широко применяются в фотоэлектронике, включая светодиоды, пьезоэлектрические преобразователи, контактные пластины, жидкие дисплеи, дисплеи, электрооптику и фотоэлектронные устройства, проводящие датчики, солнечные элементы и т. д. [1-2].

Технология пиролиза распылением является эффективной технологией для изготовления высококачественных тонких пленок с простыми производственными процессами, высокой воспроизводимостью и низкой стоимостью [2]. Для улучшения качества тонких пленок ZnO, полученных процессом пиролиза распылением, следует разумно определить параметры процесса осаждения. В прошлом было проведено много исследований для оптимизации производственных процессов тонких пленок ZnO [3-4].

Чтобы одновременно улучшить различные качественные характеры пленок ZnO, мы сначала преобразовали различные качественные характеры в один общий качественный показатель методом TOPSIS, а затем определили параметры процесса осаждения для максимального общего показателя качества методом Taguchi.

Пусть L (количество) качественных характеров тонких пленок ZnO — y_1, …, y_k, …, y_L. И пусть k-й качественный характер в i-м эксперименте — y_{ik}. (i=1, 2,…, n; k=1,2,…,L), где n — количество экспериментов.

Эти значения составляют матрицу принятия решений $Y=(y_{ik})_{n\times L}$.

Основные шаги метода TOPSIS заключается в следующем [5-6]:

Шаг 1. Используя следующую формулу из матрицы принятия решений $Y=(y_{ik})_{n\times L}$, строится стандартизованная матрица принятия решений $Z=(z_{ik})_{n\times L}$.

$$z_{ik}=\begin{cases}(y_{ik}-L_k)/(U_k-L_k); k\in K^+\\(U_k-y_{ik})/(U_k-L_k); k\in K^-\end{cases} \quad (1),$$

где U_k и L_k — максимум и минимум k-ых качественных характеров; K^+ — множество, состоящее из номеров показателей в эффективном виде; K^- — множество, состоящее из номеров показателей в стоимостном виде.

Шаг 2. Строим взвешенную стандартизованную матрицу принятия решений $V=(v_{ik})_{n\times L}$ следующим образом:

$$v_{ik}=w_k\times z_{ik};\ i=1,2,\ldots,n,\ k=1,2,\ldots,L. \quad (2),$$

где w_k — вес k-ого качественного характера.

Эти весовые значения могут быть получены путем методов стратифицированного анализа и определения веса энтропии.

Шаг 3. Определяется положительное идеальное решение $V^+=(v_1^+,\cdots,v_k^+,\cdots,v_L^+)$ и отрицательное идеальное решение $V^-=(v_1^-,\cdots,v_k^-,\cdots,v_L^-)$ следующим образом.

$$v_k^+=\max_{1\le i\le n} v_{ik},\ v_k^-=\min_{1\le i\le n} v_{ik} \quad (3)$$

Шаг 4. Вычисляются расстояние от каждой экспериментальной точки до положительных и отрицательных идеальных решений рассчитывается следующим образом. (i=1, 2,…, n)

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^{L}(v_k^+ - v_{ik})^2} \quad D_i^- = \sqrt{\sum_{k=1}^{L}(v_k^- - v_{ik})^2} \tag{4}$$

,

Шаг 5. Вычисляется относительная степень доступа, т.е. общий качественный показатель следующим образом.

$$T_i = D_i^- \big/ (D_i^+ + D_i^-) \tag{5}$$

Были выбраны концентрация предшественника (C), давление газ-носителя (P), температура подложки (T) и скорость потока раствора (F) в качестве контролируемых параметров процесса осаждения, а остаются постоянными другие параметры процесса.

Для оценки качества тонких пленок ZnO были выбраны три качественного характера: оптический коэффициент пропускания (TR), шероховатость поверхности (RO) и толщина (TH) [2]. В таблице 1 показаны основные параметры процесса осаждения и их уровни. В таблице 2 показаны результаты экспериментов в соответствии с планированием экспериментов по ортогональной таблице.

Таблица 1 – Основные параметры процесса осаждения и их уровни

Уровень	C, M	P, bar	T, ^oC	F, mL/min
1	0,05	0,5	315	4
2	0,1	1,0	365	5
3	0,2	1,5	415	6

Таблица 2 – Результаты экспериментов в соответствии с планированием экспериментов по ортогональной таблице $L_9(3^4)$.

Номер эксп.	параметры процесса осаждения				качественные характеры		
	C, M	P, bar	T, ^oC	F, mL/min	TR, %	RO, nm	TH, nm
1	0,05	0,5	315	4	73,755	10,80	188,5
2	0,05	1	365	5	71,805	21,75	147,5
3	0,05	1,5	415	6	64,925	7,25	116,0
4	0,1	0,5	365	6	75,535	9,10	176,5
5	0,1	1	415	4	80,400	5,05	130,0
6	0,1	1,5	315	5	69,780	14,65	167,0
7	0,2	0,5	415	5	81,960	7,25	217,5
8	0,2	1	315	6	78,915	6,40	256,5
9	0,2	1,5	365	4	75,705	13,00	207,0

Весы трех качественного характера определяются путем усреднения значений весов, полученных методом стратифицированного анализа и определения веса энтропии, их значения равны 0,487, 0,262 и 0,251 соответственно. В таблице 3 показаны общие значения качественных показателей и общая очередь качества пленок ZnO, полученных в девяти экспериментальных точках.

Таблица 3 – Общие значения качественных показателей и общая очередь качества пленок ZnO

Номер эксп.	C, M	P, bar	T, ^{o}C	F, mL/min	Общие значения качественных показателей	Общая очередь качества
1	0,05	0,5	315	4	0,538	6
2	0,05	1	365	5	0,412	7
3	0,05	1,5	415	6	0,410	8
4	0,1	0,5	365	6	0,637	3
5	0,1	1	415	4	0,917	1
6	0,1	1,5	315	5	0,380	9
7	0,2	0,5	415	5	0,746	2
8	0,2	1	315	6	0,637	4
9	0,2	1,5	365	4	0,562	5

В таблице 4 показаны средние значения общих качественных показателей и диапазоны параметров процесса осаждения, очереди влияний, значения оптимальных уровней и оптимальных параметров процесса осаждения на трех уровнях. На рис. 1 показаны средние значения общих качественных показателей параметров процесса осаждения на трех уровнях.

Таблица 4 – Средние значения общих качественных показателей и диапазоны параметров процесса осаждения, очереди влияний, значения оптимальных уровней и оптимальных параметров процесса осаждения на трех уровнях

Уровни	параметры процесса осаждения			
	C	P	T	F
Уровень 1	0,453	0,640	0,518	0,672
Уровень 2	0,644	0,655	0,537	0,513
Уровень 3	0,648	0,451	0,691	0,561
Диапазон	0,195	0,204	0,173	0,159
Процентное отношение диапазонов (%)	26,670	27,954	23,599	21,778
Очередь влияний	2	1	3	4
Оптимальный уровень	3	2	3	1
Оптимальные параметры процесса осаждения	0,2	1,0	415	4

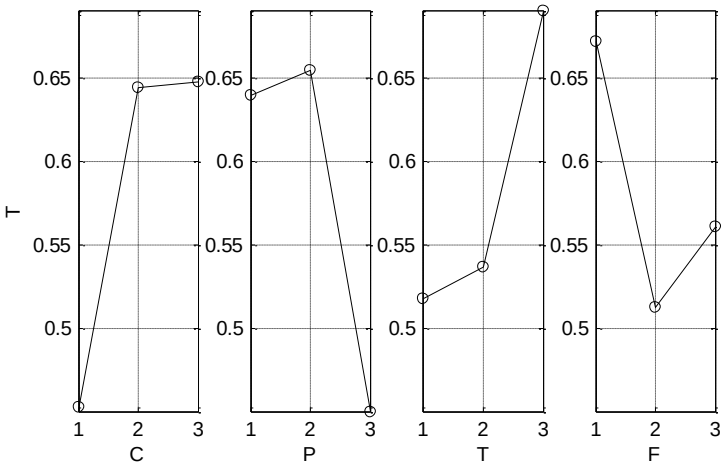


Рисунок 1. Средние значения общих качественных показателей параметров процесса осаждения на трех уровнях

Как видно в таблице 4 и на рис. 1, влияние параметров процесса осаждения на общие качественные показатели и оптимальные параметры процесса получаются следующим образом.

Очередь влияний: P (27,954 %), C (26,670 %), T (23,599 %), F (21,778 %)

Оптимальные уровни: C3P2T3F1, т.е. C-3-ий уровень, P-2-ой уровень, T-3-ий уровень, F-1-ый уровень

Оптимальные параметры процесса: C= 0,2 M, P= 1,0 bar, T= 415 °C, F= 4 mL/min

Для экспериментов проверки изготовляется тонкая пленка ZnO в вышеуказанных оптимальных условиях осаждения и измеряются значения TR, RO и TH (таблица 5).

Таблица 5 – Значения TR, RO и TH в условиях процесса осаждения, полученных разными методами

Методы	Условие изготовления	TR, nm	RO, nm	TH, nm
Оптимальный процесс осаждения, показанный в таб. 3 (экспер. 3)	C2P2T3F1	80,400	5,05	130,0
Прежний метод [2]	C3P2T2F2	85,960	1,88	79,0
Предложенный метод	C3P2T3F1	87,120	1,56	78,0

Из таблицы 5 подтверждается, что качество тонкой пленки ZnO, изготовленной в оптимальных условиях осаждения, полученных предложенным методом, лучше, чем в прежних методах.

Предложение. Предложенный метод сочетает метод Taguchi с методом TOPSIS, что позволяет определить рациональные параметры процессов.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДИЗАЙНА $L_N(P^W)\otimes L_N(R^Z)$ В СЛУЧАЕ РАЗМЕЩЕНИЯ КОНТРОЛЬНОГО ФАКТОРА ВО ВНУТРЕННЕМ И ВНЕШНЕМ ОРТОГОНАЛЬНОМ МАССИВЕ

Рюк Чхор, Юн Ок
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
rch61117@star-co.net.kp

Метод дизайна Taguchi с внутренними и внешними ортогональными массивами является наиболее эффективным и мощным способом снижения затрат на продукт, улучшения качества и одновременно сокращающих время развития.

Экспериментальный подход Taguchi к проблеме стабильности параметров (RPD) пересекает путем вращения внешнего ортогонального массива в внутреннем ортогональном массиве, который помещает параметры ошибки (шум) в качестве контроля факторов.

В этой статье мы проводим статистический анализ, когда были назначены контролирующие факторы как в лабораторной конструкции Taguchi с внутренними, так и внешними ортогональными массивами .

Пример того, как собрать соединительные аппараты эластомера в нейлоновую трубку, которая позволяет передавать требуемую растягивающую силу, демонстрирует реализацию и полезность предлагаемого метода.

1. Введение. Мы считали, что модель поверхности отклика второго порядка [1] представляет собой точную связь между факторами интереса и реакциями. В исследовании [2] предлагается новый тип дизайна, который имеет уровень 3 и обеспечивает оценку основных эффектов любым вторичным эффектом. Метод Taguchi в проблеме RPD рассматривался для применения факторов управления в внутреннем ортогональном массиве и размещать по меньшей мере один из факторов представления, факторов сигнала и шума в внешних ортогональных массивах, а [3] для оценки эффекта запутания между основными факторами факторов внимания и некоторыми конкретными факторами.

Реальные проблемы, такие как комплексное исследование взаимодействия и влияния между продуктом или оборудованием и его работой, которые мы должны развивать, трудно разместить взаимоотношения между факторами и факторами, с которыми мы имеем дело, и, следовательно, в одном ортогональном массиве, и поэтому в реальном эксперименте будет много усилий. Например, в общей работе, где мы будем работать взаимодействие и влияние между продуктом или оборудованием или оборудованием и его рабочей станцией, параметры продукта или оборудования помещаются в внутренний ортогональный массив и размещение параметров на рабочей станции в ортогональном массиве, может выявить влияние всех запутанных эффектов между внутренними ортогональными и внутренними ортогональными массивами и факторами внешних ортогональных массивов и факторами внешних ортогональных массивов, и, что может быть уточнено, что может уменьшить экспериментальное количество экспериментов.

В этой статье мы представляем, как определить модель ответа, выполняя анализ дисперсии в экспериментальной программе, которая помещает параметры продукта или оборудования в внутреннем ортогональном массиве и помещает параметры на рабочей станции в внешние ортогональные массивы.

2. Анализ дисперсии экспериментального дизайна $L_N(p^w)\otimes L_n(r^m)$

Пусть $y_{i(uv\ldots)j(u'v'\ldots)k}$ (i=1, …, N, j=1, …, n, k=1, …, t) – значение k –го эксперимента в i(i=1, …, N)-й экспериментальной сценарии внутреннего ортогонального массива и j(j=1, …, n)-й экспериментальной сценарии внешнего ортогонального массива, когда контролируемый фактор A, B (и A', B') был назначен в внутреннем (и внешнем) ортогональном массиве p^w (и r^m)и контрольный фактор, в котором уровень является p(и r) экспериментальной конструкции Taguchi с внутренним ортогональным массивом p^w и внешним ортогональным массивом r^m.

Во-первых, давайте рассмотрим сумму и среднее, рассчитанное из экспериментальных данных, удобно для теоретического описания анализа дисперсии экспериментального дизайна с внутренними и внешними ортогональными массивами, следующим символом.

Обозначим общую сумму y_{ijk} (i=1, …, N, j=1, …, n, k=1, …, t) как T и общий средний $\overline{T}$, с экспериментальными значениями экспериментального дизайна с внутренним ортогональным массивом p^w и внешним ортогональным массивом r^m, сумму экспериментальных значений A_u (и B_v) и их среднее $\overline{A_u}$ (и $\overline{B_v}$)в уровне последовательности u (и v) факторина A (и B), расположенного в внутреннем ортогональном массиве.

$$T=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},\quad \overline{T}=\frac{T}{Nnt}$$

$$A_u=\sum_{i(u)=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},$$

$$\overline{A_u}=\frac{A_u}{nlt},\ B_v=\sum_{i(v)=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},\ \overline{B_v}=\frac{B_v}{nlt},$$

$$A_uB_v=\sum_{i(u,v)=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},\ \overline{A_uB_v}=\frac{A_uB_v}{d\cdot t},$$

$$A'_{u'}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j(u')=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},\ \overline{A'_{u'}}=\frac{A'_{u'}}{Nst},$$

$$B'_{v'}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j(v')=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},\ \overline{B'_{v'}}=\frac{B'_{v'}}{Nst},$$

$$A'_{u'}B'_{v'}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j(u',v')=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},\quad \overline{A'_{u'}B'_{v'}}=\frac{A'_{u'}B'}{e\cdot t},$$

$$A_uA'_{u'}=\sum_{i(u)=1}^{N}\sum_{j(u')=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},\quad \overline{A_uA'_{u'}}=\frac{A_uA'_{u'}}{lst}$$

Для простоты для рассмотрения факториальных изменений экспериментального дизайна с внутренними и внешними ортогональными массивами, как будто это псевдо-фактор, имеющий внутренний (внешний) ортогональный массив и уровень, и это можно увидеть в каждой комбинации «*Inner*» и «*Outer*».

Здесь l=N/p (и s=n/r)- количество итераций уровня в каждом столбце внутреннего (и внешнего) ортогонального массива, $\sum_{i(u)=1}^{N}$ (и $\sum_{j(u')=1}^{n}$)- сумма данных на уровне u (и u') каждого столбца внутренних (и внешних)ортогональных массивов,

$d=N/p^2$(и $e=n/r^2$) – это количество итераций пары (u, v) (и (u', v'))двух рядов фактора A, B(и A', B'), расположенного в двух рядах внутреннего (и внешнего) ортогонального массива, $\sum_{i(u,v)=1}^{N}$ (и $\sum_{j(u',v')=1}^{n}$) обозначает сумму данных в двух уровнях пары (u, v) (и (u', v')) двух столбцов внутренних (и внешних) ортогональных массивов.

Для простоты рассмотрения факториальных изменений экспериментального дизайна с внутренними и внешними ортогональными массивами, мы можем видеть, что, как будто это виртуальный фактор, имеющий уровень экспериментального номера внутреннего (и внешнего) ортогонального массива, и обозначим это как «*Inner*» (и «*Outer*»), и мы можем найти экспериментальные значения t на каждом уровне «*Inner*» и «*Outer*».

Таким образом, мы можем видеть, что экспериментальные значения y_{ijk} (i=1, …, N, j=1, …, n, k=1, …, t) были получены в бинарных экспериментах виртуальных факторов 《*Inner*》 и 《*Outer*》 , где уровень N, n соответственно.

Теперь мы обозначим сумму экспериментальных значений на уровне i (и j) виртуального фактора «*Inner*» (и 《*Outer*》)и его среднее значение $Y_{i\cdot\cdot}$ (и$Y_{\cdot j\cdot}$), $y_{i\cdot\cdot}$(i=1, …, N)(и $y_{\cdot j\cdot}$(j=1, …, n)), и сумму экспериментальных значений и их среднее значение в комбинации уровня (i, j) фактора «*Inner*» и 《*Outer*》 , соответственно, $Y_{ij\cdot}$, $y_{ij\cdot}$(i=1, …, N , j=1, …, n).

Каждая вариация, состоящая из уравнения 2, представлена следующим образом.

$$Y_{i\bullet\bullet}=\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},\ Y_{\bullet j\bullet}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},\ Y_{ij\bullet}=\sum_{k=1}^{t}y_{ijk}$$

$$y_{i\bullet\bullet}=\frac{1}{nt}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},\ y_{\bullet j\bullet}=\frac{1}{Nt}\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk},$$

$$y_{ij\bullet}=\frac{1}{t}\sum_{k=1}^{t}y_{ijk}$$

Из тождественное уравнение
$$y_{ijk}=\overline{T}+(y_{i\bullet\bullet}-\overline{T})+(y_{\bullet j\bullet}-\overline{T})+$$
$$+(y_{ij\bullet}-y_{i\bullet\bullet}-y_{\bullet j\bullet}+\overline{T})+(y_{ijk}-y_{ij\bullet})$$

Как и в двухуровневом экспериментальном дизайне, уравнение имеет следующие отношения.

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}(y_{ijk}-\overline{T})^2=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}(y_{i\bullet\bullet}-\overline{T})^2+$$
$$+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}(y_{\bullet j\bullet}-\overline{T})^2+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}(y_{ij\bullet}-$$
$$-y_{i\bullet\bullet}-y_{\bullet j\bullet}+\overline{T})^2++\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}(y_{ijk}-y_{ij\bullet})^2 \quad (1)$$

Из уравнения 1

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}(y_{ijk}-\overline{T})^2 = SS_T,$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}(y_{i\bullet\bullet}-\bar{T})^2 = SS_{Inner},$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}(y_{\bullet j\bullet}-\bar{T})^2 = SS_{Outer},$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}(y_{ij\bullet}-y_{i\bullet\bullet}-y_{\bullet j\bullet}+\bar{T})^2 = SS_{Inner\times Outer},$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t}(y_{ijk}-y_{ij\bullet})^2 = S_{e_4}$$

Выражение 1 – это следующее.

$$SS_T = SS_{Inner} + SS_{Outer} + SS_{Inner\times Outer} + SS_{e_4} \quad (2)$$

Здесь SS_T – это общая дисперсия, и SS_{Inner} (и SS_{Outer}) является изменчивостью внутри (и внешнего) ортогонального массива в качестве изменчивости виртуального фактора «*Inner*» (и «*Outer*) соответственно. $SS_{Inner\times Outer}$ – это изменение поведения запутания виртуальных факторов « *Inner* » и «*Outer*». SS_{e_4} - это изменение ошибки e_4 по повторным данным в каждой комбинации виртуального фактора « *Inner* » и «*Outer*».

Каждая вариация, состоящая из уравнения 2, представлена следующим образом.

$$SS_T = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{t} y_{ijk}^2 - CF \quad (3)$$

$$SS_{Inner} = \frac{1}{nt}\sum_{i=1}^{N} Y_{i\bullet\bullet}^2 - CF \quad (4)$$

$$SS_{Outer} = \frac{1}{Nt}\sum_{j=1}^{n} Y_{\bullet j\bullet}^2 - CF \quad (5)$$

$$SS_{Inter\times Outer} = \frac{1}{t}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n} Y_{ij\bullet}^2 - CF - S_{Inter} - S_{Outer} \quad (6)$$

$$S_{e_4} = S_T - (S_{Inter} + S_{Outer} + S_{Inter\times Outer}) \quad (7)$$

Здесь

$$CF = \frac{T^2}{Nnt} \quad (8)$$

Изменение виртуальных факторов «Inner»(«Outer») является следующим, если мы представляем изменение взаимодействия между факторами и факторами внутреннего (внешнего) ортогонального массива, а также изменение взаимодействия взаимодействия виртуальных факторов «Inner » и «Outer» с использованием изменений в взаимодействии между факторами внутреннего и внешнего ортогонального массива.

$$SS_{Inner} = SS_A + SS_B + SS_{A\times B} + \ldots + SS_{e_1} \quad (9)$$

$$SS_{Outer} = SS_{A'} + SS_B + SS_{A'\times B} + \ldots + SS_{e_2} \quad (10)$$

$$SS_{Inter\times Outer} = SS_{A\times A'} + SS_{A\times B} + \ldots + SS_{e_3} \quad (11)$$

Символическое представление уравнения 2 с использованием уравнения 9~11.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{A\times B} + \ldots + SS_{e_1} + SS_{A'} + SS_B + SS_{A'\times B} + \ldots + + SS_{e_2} + SS_{A\times A'} + SS_{A\times B} + \ldots + SS_{e_3} + SS_{e_4} \quad (12)$$

Здесь

$$SS_A = \frac{1}{nlt}\sum_{u=1}^{p} A_u^{\,2} - CF,\ SS_B = \frac{1}{nlt}\sum_{v=1}^{p} B_u^{\,2} - CF \quad (13)$$

$$\mathrm{SS_{A\times B}} = \frac{1}{ndt}\sum_{u=1}^{p}\sum_{v=1}^{p} A_u B_v^{\,2} - \mathrm{CF} - \mathrm{SS_A} - \mathrm{SS_B} \quad (14)$$

$$SS_{A'} = \frac{1}{Nst}\sum_{u'=1}^{r} A_{u'}'^{\,2} - CF \quad (15)$$

$$SS_{B'} = \frac{1}{Nst}\sum_{v'=1}^{r} B_{v'}'^{\,2} - CF \quad (16)$$

$$SS_{A'\times B'} = \frac{1}{Net}\sum_{u'=1}^{r}\sum_{v'=1}^{r} A_{u'}' B_{v'}'^{\,2} - CF - SS_{A'} - SS_{B'} \quad (17)$$

$$SS_{A\times A'} = \frac{1}{lst}\sum_{u=1}^{p}\sum_{u'=1}^{r} A_u A_{u'}'^{\,2} - CF - SS_A - SS_{A'} \quad (18)$$

$$SS_{A\times B'} = \frac{1}{lst}\sum_{u=1}^{p}\sum_{v'=1}^{r} A_u B_{v'}'^{\,2} - CF - SS_A - SS_{B'} \quad (19)$$

$$SS_{e_3} = SS_{Inner\times Outer} - (SS_{A\times A'} + SS_{A\times B} + \ldots) \quad (20)$$

$$SS_{e_4} = SS_T - (SS_{Inner} + SS_{Outer} + SS_{Inner\times Outer}) \quad (21)$$

Затем мы предлагаем экспериментальную модель $y_{i(uv\ldots)j(u'v'\ldots)k}$, которую мы эксперимен тально в экспе риментальном дизайне $L_N(p^w)\otimes L_{\mathrm{n}}(r^m)$, чтобы обеспечить теоретическое описание оценки эффекта фактора, следующим образом.

$$Y_{i(uv\ldots)j(u'v'\ldots)k} = m + \alpha_u + \beta_v + \ldots + (\alpha\beta)_{uv} + \ldots + \delta_{u'} + + \lambda_{v'} + \ldots + (\delta\lambda)_{u'v'} + \ldots + (\alpha\delta)_{uu'} + \ldots + \varepsilon_{ijk} \quad (22)$$

$$\sum_{u=1}^{p}\alpha_u = 0, \sum_{v=1}^{p}\beta_v = 0, \cdots, \sum_{u'=1}^{r}\delta_{u'} = 0, \sum_{v'=1}^{r}\lambda_{v'} = 0,$$

$$\cdots, \sum_{u=1}^{p}(\alpha\beta)_{uv} = \sum_{v=1}^{p}(\alpha\beta)_{uv} = 0, \sum_{u'=1}^{r}(\delta\lambda)_{u'v'} =$$

$$= \sum_{v'=1}^{r}(\alpha\beta)_{u'v'} = 0, \sum_{u=1}^{p}(\alpha\delta)_{uu'} = \sum_{u'=1}^{r}(\alpha\delta)_{uu'} = 0$$

(i=1, …, N, j=1, …, n, k=1, …, t, u=1, …, p, v=1, …, p, …, u'=1, …,r, v'=1, …,r, …)

Здесь m – среднее, α_u(и β_v)- влияние фактора A(и B) на уровне u(и v), $(\alpha\beta)_{uv}$- влияние эффекта запутания $A\times B$ факторов A и B на уровне пары (u, v), $\delta_{u'}$ (и $\lambda_{v'}$)- влияние фактора A'(и B') на уровне u'(и v'), $(\delta\lambda)_{u'v'}$-влияние эффекта запутания $A'\times B'$ факторов A' и B'на уровне пары (u', v'), $(\alpha\delta)_{uu'}$- влияние эффекта запутания $A\times A'$ факторов A и A'на уровне пары (u, u'), ε_{ijk} –независимая экспериментальная ошибка с $N(0, \sigma^2)$.

Мы будем обозначать $y_{i(uv\ldots)j(u'v'\ldots)k}$ как y_{ijk} для удобства.

Для общей суммы квадратной ошибки $\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{r}\sum_{k=1}^{t}\varepsilon_{ijk}^{\ 2}$ экспериментальной модели

$$22.\quad \begin{array}{l} \hat{m}=\overline{T},\ \hat{\alpha}_u=\overline{A_u}-\overline{T},\ \hat{\beta}_v=\overline{B_v}-\overline{T}, \\ \hat{(\alpha\beta)}_{uv}=\overline{A_uB_v}-\overline{A_u}-\overline{B_v}+\overline{T},\ \hat{\delta}_{u'}=\overline{A'_{u'}}-\overline{T}, \\ \hat{\lambda}_{v'}=\overline{B_{v'}}-\overline{T},\ \hat{(\delta\lambda)}_{u'v'}=\overline{A'_{u'}B'_{v'}}-\overline{A'_{u'}}-\overline{B'_{v'}}+\overline{T}, \\ \hat{(\alpha\delta)}_{uu'}=\overline{A_uA'_{u'}}-\overline{A_u}-\overline{A'_{u'}}+\overline{T} \end{array} \qquad (23)$$

Эти являются MVUE Параметров m, α_u, β_v, $(\alpha\beta)_{uv}$, $\delta_{u'}$, $\lambda_{v'}$, $(\delta\lambda)_{u'v'}$, $(\alpha\delta)_{uu'}$. Аналогичным образом, также представлены другие факторы.

Дисперсия оценки эффектов фактора 23 соответственно.

$$Var\{\hat{\alpha}_u\}=\frac{p-1}{Nnt}\sigma^2,\ Var\{\hat{\beta}_v\}=\frac{p-1}{Nnt}\sigma^2,\ Var\{\hat{(\alpha\beta)}_{uv}\}=\frac{(p-1)^2}{Nnt}\sigma^2,$$
$$Var\{\hat{\delta}_{u'}\}=\frac{r-1}{Nnt}\sigma^2,$$
$$Var\{\hat{\lambda}_{v'}\}=\frac{r-1}{Nnt}\sigma^2, \qquad (24)$$
$$Var\{\hat{(\alpha\delta)}_{uu'}\}=\frac{(p-1)(r-1)}{Nnt}\sigma^2,$$
$$Var\{\hat{(\delta\lambda)}_{u'v'}\}=\frac{(r-1)^2}{Nnt}\sigma^2$$

Аналогично, также представлены другие дисперсии.

Математическое ожидание каждой дисперсии для экспериментальных значений экспериментального дизайна $L_N(p^w)\otimes L_n(r^m)$ соответственно.

$$E[SS_T]=(Nnt\text{-}1)\sigma^2,\ E[SS_{Inner}]=(N\text{-}1)\sigma^2,\ E[SS_{Outer}]=(n\text{-}1)\sigma^2,$$
$$E[SS_A]=(p\text{-}1)\sigma^2+ltn\sum_{u=1}^{p}\alpha_u^2,\ E[SS_B]=(p\text{-}1)\sigma^2+ltn\sum_{v=1}^{p}\beta_v^2,$$
$$E[SS_{A\times B}]=(p\text{-}1)^2\sigma^2+ltn\sum_{u=1}^{p}\sum_{v=1}^{p}(\alpha\beta)_{uv}^2,$$
$$E[SS_{A'}]=(r\text{-}1)\sigma^2+stN\sum_{u'=1}^{r}\delta_{u'}^2,\ E[SS_{B'}]=(r\text{-}1)\sigma^2+stN\sum_{v'=1}^{r}\lambda_{v'}^2,$$
$$E[SS_{A'\times B'}]=(r\text{-}1)^2\sigma^2+ltn\sum_{u'=1}^{r}\sum_{v'=1}^{r}(\delta\lambda)_{u'v'}^2,$$
$$E[SS_{A\times A'}]=(p\text{-}1)(r\text{-}1)\sigma^2+lst\sum_{u=1}^{p}\sum_{u'=1}^{r}(\alpha\delta)_{uu'}^2$$

Для экспериментальной модели 22 мы устанавливаем следующую нулевую гипотезу.

$$\begin{array}{c} H_A\text{: }\alpha_u=0,\ u=1,\ 2,\ \ldots,\ p \\ H_B\text{: }\beta_v=0,\ v=1,\ 2,\ \ldots,\ p \\ H_{A\times B}\text{: }(\alpha\beta)_{uv}=0,\ u=1,\ 2,\ \ldots,\ p,\ v=1,\ 2,\ \ldots,\ p \\ H_{A'}\text{: }\delta_{u'}=0,\ u'=1,\ 2,\ \ldots,\ r \\ H_{B'}\text{:}\lambda_{v'}=0,\ v'=1,\ 2,\ \ldots,\ r \\ H_{A'\times B'}\text{: }(\delta\lambda)_{u'v'}=0,\ u'=1,\ 2,\ \ldots,\ r,\ v'=1,\ 2,\ \ldots,\ r \\ H_{A\times A'}\text{: }(\alpha\delta)_{uu'}=0,\ u=1,\ 2,\ \ldots,\ p,\ u'=1,\ 2,\ \ldots,\ r \end{array} \qquad (25)$$

Аналогичным образом, оставшиеся факторы также устанавливают нулевую гипотезу.

Гипотеза 25 для экспериментальной модели 22.

$E[SS_A/(p\text{-}1)]=\sigma^2$, $E[SS_B/(p\text{-}1)]=\sigma^2$, $E[SS_{A\times B}/(p\text{-}1)^2]=\sigma^2$, $E[SS_{A'}/(r\text{-}1)]=\sigma^2$, $E[SS_{B'}/(r\text{-}1)]=\sigma^2$, $E[SS_{A'\times B'}/(r\text{-}1)^2]=\sigma^2$,

$E[SS_{A\times A'}/((p\text{-}1)(r\text{-}1))]=\sigma^2$

Степень свободы для уравнений 3~5, 12~18 соответственно.

Следовательно, каждая степень свободы является следующим образом.

$Df_T=Nnt\text{-}1$, $df_{Inner}=N\text{-}1$, $df_{Outer}=n\text{-}1$, $df_A=p\text{-}1$, $df_B=p\text{-}1$, $df_{A\times B}=df_A\times df_B=(p\text{-}1)^2$, $df_{A'}=r\text{-}1$, $df_{B'}=r\text{-}1$,

$df_{A'\times B'}=df_{A'}\times df_{B'}=(r\text{-}1)^2$, $df_{A\times A'}=df_A df_{A'}=(p\text{-}1)(r\text{-}1)$

Аналогичным образом, также представлены степени свободы других факторов.

Следовательно, математическое ожидание дисперсии параметров ошибки e_1, e_2, e_3 и ошибки повторения e_4 при гипотезе 25 для экспериме нтальной модели 22 соответственно.

$$E[SS_{e_1}]=(df_{Inner}-(df_A+df_B+\ldots))\sigma^2,$$

$$E[SS_{e_2}]=(df_{Outer}-(df_{A'}+df_{B'}+\ldots))\sigma^2,$$

$$E[SS_{e_3}]=(df_{Inner}df_{Outer}-(df_{A\times A'}+df_{A\times B'}+\ldots))\sigma^2,$$

$$E[SS_{e_4}]=(df_T-df_{Inner}-df_{Outer}-df_{Inner}df_{Outer})\sigma^2$$

Степень свободы ошибки e_1, e_2, e_3, итерационной ошибки e_4 соответственно.

$$df_{e_1}=df_{Inner}-(df_A+df_B+\ldots),\ df_{e_2}=df_{Outer}-(df_{A'}+df_{B'}+\ldots),$$

$$df_{e_3}=df_{Inne}\ df_{Outer}-(df_{A\times A'}+df_{A\times B'}+\ldots),$$

$$df_{e_4}=df_T-df_{Inner}-df_{Outer}-df_{Inne}-df_{Outer}$$

Следовательно, под гипотезой 25 для экспериментальной модели 22 SS_T/σ^2 следует χ^2-распредле-нию степени свободы df_T, SS_{Inner}/σ^2 с степени свободы df_{Inner}, SS_{Outer}/σ^2 с степени свободы df_T, SS_A/σ^2 с степени свободы df_A, $SS_{A\times B}/\sigma^2$ с степени свободы $df_{A\times B}$, SS_{e_1}/σ^2 с степени свободы df_{e_1}, $SS_{A'}/\sigma^2$ с степени свободы $df_{A'}$, $SS_{A'\times B'}/\sigma^2$ с степени свободы $df_{A'\times B'}$, SS_{e_2}/σ^2 с степени свободы df_{e_2}, $SS_{A\times A'}/\sigma^2$ с степени свободы $df_{A\times A'}$, SS_{e_3}/σ^2 с степени свободы df_{e_3}, SS_{e_4}/σ^2 с степени свободы df_{e_4}.

Обозначим коэффициент ошибки e, путем группировки факторов ошибок e_1, e_2, e_3 и итерационного коэффициента времени e_4, обозначающий коэффициент ошибки e, его дисперсия и степень свободы соответственно.

$$SS_e=SS_{e_1}+SS_{e_2}+SS_{e_3}+SS_{e_4} \tag{26}$$

$$df_e=df_{e_1}+df_{e_2}+df_{e_3}+df_{e_4}$$

SS_e/σ^2 следует χ^2-распредлению степени свободы df_e.

Рассеяние каждого фактора и коэффициента ошибки соответственно.

$$MS_A=\frac{SS_A}{df_A},\quad MS_{A\times B}=\frac{SS_{A\times B}}{df_{A\times B}},\quad MS_{e_1}=\frac{SS_{e_1}}{df_{e_1}},\quad MS_{A'}=\frac{SS_{A'}}{df_{A'}},\quad MS_{A'\times B'}=\frac{SS_{A'\times B'}}{df_{A'\times B'}},$$

$$MS_{e_2}=\frac{SS_{e_2}}{df_{e_2}},$$

$$MS_{A\times A'}=\frac{SS_{A\times A'}}{df_{A\times A'}},\ MS_{e_3}=\frac{SS_{e_3}}{df_{e_3}},\ MS_{e_4}=\frac{SS_{e_4}}{df_{e_4}},\ MS_e=\frac{SS_e}{df_e}$$

Аналогичным образом, также могут быть представлены дисперсии других факторов.

Если есть значения дисперсии факторов, которые не превышают значение дисперсии MS_e факторaошибки e, мы создаем новую ошибку (e), размещая 《 < 1》 - знак и добавляя к ошибкам e.

Затем степень свободы, дисперсия и дисперсия нового фактора ошибки (e) обозначаются $df_{(e)}$, $SS_{(e)}$, $MS_{(e)}$ соответственно.

Коэффициент дисперсии F_0 каждого фактора является следующим образом.

$$F_A=\frac{MS_A}{MS_{(e)}},\quad F_{A\times B}=\frac{MS_{A\times B}}{MS_{(e)}},\quad F_{A'}=\frac{MS_{A'}}{MS_{(e)}},$$

$$F_{A'\times B'}=\frac{MS_{A'\times B'}}{MS_{(e)}},\quad F_{A\times A'}=\frac{MS_{A\times A'}}{MS_{(e)}},$$

Аналогичным образом, также могут быть представлены коэффициенты дисперсии других факторов. Затем отношение дисперсии F_A следует F-распределению с степени свободы df_A, $df_{(e)}$, $F_{A\times B}$ с степени свободы $df_{A\times B}$, $df_{(e)}$, $F_{A'\times B'}$ с степени свободы $df_{A'\times B'}$, $df_{(e)}$, $F_{A\times A'}$ с степени свободы $df_{A\times B'}$, $df_{(e)}$.

3. Модели регрессии и оптимизация

Экспериментальная регрессионная модель может быть представлена следующим образом, когда были назначены l (и q) управляемые факторы A, B (и A', B') и т. Д. Для удобства внутренний (и внешний) ортогональный массив p^w (и r^m), обозная это с $X=[x_1, x_2, \ldots, x_l]$ (и $Z=[z_1, z_2, \ldots, z_q]$).

$$Y(X, Z)=f(X)+g(Z)+h(X, Z)+\varepsilon \qquad (27)$$

Здесь $f(X)$ (и $g(Z)$) является частью модели для переменной X (и Z) внутренней (и внешней) ортогональной массивов, $h(X, Z)$- часть модели, которая влияет взаимодействие между переменными внутренних и внешних ортогональных массивов. И ε – компонент ошибки. Например, если количество факторов внутреннего и внешнего ортогонального массива составляет 3, а факторы фактора не являются прямыми, модель регрессии является квадратичной моделью. Таким образом, в экспериментальной конструкции с внутренним и внешним ортогональным массивом с $p=r=3$ регрессионная модель для экспериментального y_{ijk}(i=1, 2, …, N, j=1, 2, …, n, k=1, 2 …, t) может быть установлена следующим образом.

$$y_{ijk}=\beta_0+\sum_{i=1}^{l}\beta_i x_i+\sum_{1\le i<j\le l}\beta_{ij}x_i x_j+\sum_{i=1}^{l}\beta_{ii}x_i^2+\sum_{i=1}^{m}\gamma_i z_i+$$
$$+\sum_{1\le i<j\le m}\gamma_{ij}z_i z_j+\sum_{i=1}^{m}\gamma_{ii}z_i^2+\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{m}\lambda_{ij}x_i z_j+\varepsilon_{ijk} \qquad (28)$$

(i=1, 2, …, N, j=1, 2, …, n, k=1, 2, …, t)

Затем регрессия (ответ) оценки модели для экспериментального дизайна y_{ijk}(i=1, 2, …, N, j=1, 2, …, n, k=1, 2, …, t) является следующим.

$$\hat{y}_{ij}=\hat{\beta}_0+\sum_{i=1}^{l}\hat{\beta}_i x_i+\sum_{1\le i<j\le l}\hat{\beta}_{ij}x_i x_j+\sum_{i=1}^{l}\hat{\beta}_{ii}x_i^2+\sum_{i=1}^{m}\hat{\gamma}_i z_i+\quad+\sum_{1\le i<j\le m}\hat{\gamma}_{ij}z_i z_j+\sum_{i=1}^{m}\hat{\gamma}_{ii}z_i^2+\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{m}\hat{\lambda}_{ij}x_i z_j \qquad (29)$$

(i=1, 2, …, N, j=1, 2, …, n)

Если случай p=3, r=2 эффект факторов внутреннего ортогонального массива не является прямой, то регрессия (ответ) может быть в следующей форме.

$$y_{ijk} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{l} \beta_i x_i + \sum_{1 \le i < j \le l} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{l} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{m} \gamma_i z_i + \\ + \sum_{1 \le i < j \le m} \gamma_{ij} z_i z_j + \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{m} \lambda_{ij} x_i z_j + \varepsilon_{ijk} \qquad (30)$$

(i=1, 2, …, N, j=1, 2, …, n, k=1, 2, …, t)

В вышеуказанных уравнениях коэффициенты регрессии и оптимальное решение могут быть получены с использованием программы.

В следующем примере мы описываем как оптимальные условия эксплуатации, так и функции ответа, когда мы размещаем все управляемые факторы в экспериментальном дизайне $L_N(p^w) \otimes L_n(r^m)$.

4. Пример

В таблице 1 показана экспериментальная программа и параметры ответа на процесс сборки упругого соединительного устройства в нейлоно вую трубку для обеспечения силы растяжения. Мы размещали четыре фактора, которые являются тремя уровнями в внутренней ортогональной массиве $L_9(3^4)$, в таблице 1 (a) и три фактора, которые являются двумя уровнями в внешнем ортогональном массиве $L_8(2^{7-4})$, в таблице 1 (b). (*A*=интерференция, *B*=толщина соединительного устройства, *C*=глубина вставки, *D*=адгезия, *E*=время предварительного нагрева, *F*=температура предварительного нагрева, *G*=отно сительная влажность) [3].

Таблица 1 – Экспериментальный дизайн и экспериментальные данные прочности на растяжение с внутренними и внешними ортогональными массивами

(a) Inner Array					(b) Outer Array							
					№	1	2	3	4	5	6	7	8
					E	1	1	1	1	2	2	2	2
					F	1	1	2	2	1	1	2	2
					G	1	2	1	2	1	2	1	2
№	A	B	C	D		прочность при растяжении							
1	1	1	1	1		15.6	9.5	16.9	19.9	19.6	19.6	20.0	19.1
2	1	2	2	2		15.0	16.2	19.4	19.2	19.7	19.8	24.2	21.9
3	1	3	3	3		16.3	16.7	19.1	15.6	22.6	18.2	23.3	20.4
4	2	1	2	3		18.3	17.4	18.9	18.6	21.0	18.9	23.2	24.7
5	2	2	3	1		19.7	18.6	19.4	25.1	25.6	21.4	27.5	25.3
6	2	3	1	2		16.2	16.3	20.0	19.8	14.7	19.6	22.5	24.7
7	3	1	3	2		16.4	19.1	18.4	23.6	16.8	18.6	24.3	21.6
8	3	2	1	3		14.2	15.6	15.1	16.8	17.8	19.6	23.2	24.2
9	3	3	2	1		16.1	19.9	19.3	17.3	23.1	22.7	22.6	28.6

В этом примере мы проводим анализ дисперсии, оценивают оптимальное состояние и среднее значение процесса и получает модель регрессии.

① Анализ дисперсии

Из таблицы 1, найдя сумму данных, связанных с уровнем факторов внутренних и внешних ортогональных массивов, показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Бинарная таблица факторов внутренних и внешних ортогональных массивов

(а)

уровень	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	
E_1	199.4	228.3	211.8	212.6	214.3	212.6	
E_2	248.4	269.1	263.1	247.4	270.2	263	
Сумма	447.8	497.4*	474.9	460	484.5*	475.6	
уровень	C_1	C_2	C_3	D_1	D_2	D_3	сумма
E_1	195.9	215.6	228	217.3	219.6	202.6	639.5
E_2	244.6	270.4	265.6	275.1*	248.4	257.1	780.6*
Сумма	440.5	486	493.6*	492.4	468	459.7	1420.1

(б)

уровень	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	
F_1	208.8	227.7	219.9	210.8	223.2	222.4	
F_2	239	269.7*	255	249.2	261.3*	253.2	
уровень	C_1	C_2	C_3	D_1	D_2	D_3	сумма
F_1	198.3	228.1	230	231.4	208.4	216.6	656.4
F_2	242.2	257.9	263.6*	261*	259.6	243.1	763.7*

(в)

уровень	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	
G_1	231.7	247	227.3	229.4	240.8	235.8	
G_2	216.1	250.4*	247.6	230.6	243.7*	239.8	
уровень	C_1	C_2	C_3	D_1	D_2	D_3	сумма
G_1	215.8	240.8	249.4	245.4	227.6	233	706
G_2	224.7	245.2	244.2	247*	240.4	226.7	714.1*

Используя таблицы 1 и 2, вариации из расчета дисперсии каждого фактора, соответственно, и анализ дисперсии показан в таблице 3.

Таблица 3 – Таблица анализа дисперсии

фактор	SS	df	MS	F_0
A	51.40	2	25.70	7.67
B	12.817	2	6.408	1.913
C	68.717	2	34.359	10.255
D	24.077	2	12.039	3.593
e_1	0	0	0	-
E	276.517	1	276.517	82.529
F	159.907	1	159.907	47.726
G	0.911	1	0.911	< 1
e_2	8.348	4	2.087	-
A×E	2.539	2	1.269	< 1
A×F	2.929	2	1.464	< 1
A×G	26.881	2	13.440	4.011
B×E	9.984	2	4.992	1.490
B×F	1.544	2	0.772	< 1
B×G	0.169	2	0.083	< 1
C×E	6.337	2	3.168	< 1
C×F	4.435	2	2.218	< 1
C×G	4.323	2	2.161	< 1
D×E	21.005	2	10.503	< 1
D×F	15.087	2	7.543	

D×G	7.676	2	3.838	< 1
e_3	138.372	32	4.324	
e_4	0	0	0	< 1
				3.135
				2.261
				< 1
				-
				-
e	146.72	36	4.076	-
(*e*)	(177.578)	(53)	(3.351)	-
суммаl	843.970	71		

Критерий значимости факторов в таблице 3 проводился с использованием *F*-таблица распределения, а значимый фактор при уровне 0.05 является *A, B, C, D, E, F, A×G, D×E, D×F*, азначимый фактор при уровне 0.01 является *A, C, D, E, F, A×G, D×E, D×F*.

Как показано в таблице 3, среди важных факторов, факторы внешнего ортогонального массива *E* и *F* влияют больше, чем факторы внутреннего ортогонального массива. Это указывает на то, что размещение контрольных факторов без размещения фактора ошибки в внешней ортогональной масс иве может выявить не только влияние факторов внутреннего и внешнего ортогонального массива, но и эффекты запутывания между ними. Оптимальное определение условий и оценка среднего процесса.

② Оптимальное определение условий и оценка среднего процесса.

Из таблицы 2 оптимальное условие – это $A_2B_2C_3D_1E_2F_2G_2$.

На уровне значимости 0.05, используя оптимальный уровень факторов, которые были значимыми, мы оцениваем среднее значение процесса оптимального состояния.

$$\hat{\mu} = \overline{T} + (\overline{A_2} - \overline{T}) + (\overline{B_2} - \overline{T}) + (\overline{C_3} - \overline{T}) + (\overline{D_1} - \overline{T}) + (\overline{E_2} - \overline{T}) + (\overline{F_2} -$$
$$- \overline{T}) + (\overline{A_2G_2} - \overline{A_2} - \overline{G_2} + \overline{T}) + (\overline{D_1E_2} - \overline{D_1} - \overline{E_2} + \overline{T}) + (\overline{D_1F_2} - \overline{D_1} -$$
$$- \overline{F_2} + \overline{T}) = \overline{B_2} + \overline{C_3} - \overline{D_1} - \overline{G_2} + \overline{A_2G_2} + \overline{D_1E_2} + \overline{D_1F_2} - 2\overline{T} =$$
$$= \frac{484.5 + 493.6 - 492.4}{24} - \frac{714.1}{36} + \frac{250.4 + 275.1 + 261}{36} - 2\frac{1420.1}{72} =$$

=26.496

Аналогичным образом на уровне значимости 0.01.

$$\hat{\mu} = \overline{T} + (\overline{A_2} - \overline{T}) + (\overline{C_3} - \overline{T}) + (\overline{D_1} - \overline{T}) + (\overline{E_2} - \overline{T}) + (\overline{F_2} - \overline{T}) + (\overline{A_2G_2} - \overline{A_2} -$$
$$- \overline{G_2} + \overline{T}) + (\overline{A_2G_2} - \overline{A_2} - \overline{G_2} + \overline{T}) + (\overline{D_1E_2} - \overline{D_1} - \overline{E_2} + \overline{T}) + (\overline{D_1F_2} -$$
$$- \overline{D_1} - \overline{F_2} + \overline{T}) = \overline{C_3} - \overline{D_1} - \overline{G_2} + \overline{A_2G_2} + \overline{D_1E_2} + \overline{D_1F_2} - \overline{T} =$$
$$= \frac{493.6 - 492.4}{24} - \frac{714.1}{36} + \frac{250.4 + 275.1 + 261}{36} + \frac{1420.1}{72} = 26.032$$

③ Оценка и сравнение модели ответа.

Оценка регрессии 30 в Matlab с использованием данных в таблице 1 заключается в следующем.

$$\hat{y} = 6.0703 + 7.7478x_1x_4 + 4.3490x_2x_3 - 2.7307x_2x_4 +$$
$$+ 3.1095x_3x_4 - 3.859\,x_1^2 + 0.0751\,x_2^2 - 1.9262\,x_3^2 -$$
$$- 4.0069\,x_4^2 + 3.4925z_1 + 1.9503z_2 - 0.9284z_3 + 0.9454z_1z_2 -$$

$$-0.7788z_1z_3+0.5435z_2z_3+0.0826\ x_1z_1+0.3176x_1z_2+$$
$$+1.5091x_1z_3+0.6368x_2z_1-0.3299x_2z_2+0.1299x_2z_3-$$
$$-0.4757x_3z_1-0.4424x_3z_2-0.5743x_3z_3-0.1507x_4z_1-$$
$$-0.1424x_4z_2-0.3159x_4z_3$$

В оптимальном состоянии $A_2B_2C_3D_1E_2F_2G_2$, то есть в x_1=2, x_2=2, x_3=3, x_4=1, z_1=2, z_2=2, z_3=2, оцен ка регрессии составляет $\hat{y}$ =26.130.

Как показано, разница в оценке среднего процесса и регрессии в оптимальных условиях составляет 0.36 и 0.098 при уровнях значимости 0.05 и 0.01 соответственно.

5. Заключение

Экспериментальный дизайн используется для определения оптимальных уровней для контролируемых факторов. Реальная экспериментальная конструкция с внутренними и внешними ортогональными массивами обычно имеет много наблюдений.

В этой статье предлагается эффективный анализ дисперсии при размещении контролируемых факторов в экспериментальном дизайне.

Влияние каждого фактора было проанализировано статистическим методом с использованием экспериментальных значений для оценки качества в внутренних и внешних ортогональных массивах.

Получение модели ответа на $L_N(p^w)\otimes L_n(r^m)$ может быть преобразован в задачу получения оптимальных условий параметров.

1. WILLIS A. JENSEN Confirmation Runs in Design of Experiments ournal of Quality Technology Vol. 48, No. 2, April 2016.
2. CHRISTOPHER J. NACHTSHEIM A Class of Three-Level Designs for Definitive Screening in the Presence of Second-Order Effects Journal of Quality Technology Vol. 43, No. 1, January 2011.
3. DOUGLAS C. MONTGOMERY Introduction to Statistical Quality Control, Sixth Edition. 2009. John Wiley & Sons, Inc. 150~168, 568~599, 605~619.

ОБОБЩЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ОГРАНИЧЕННОЙ *P*-ВАРИАЦИИ В ЗАДАЧАХ ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ*

О. Н. Самсонюк
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
olga.samsonyuk@icc.ru

В докладе исследуется задача релаксационного (импульсно-траекторного) расширения управляемых систем с правой частью, аффинной по управлению, при отсутствии равномерного ограничения на L^1-норму управляющих функций. При этом не предполагается выполнение свойства инволютивности векторных полей – в частности, не требуется их коммутативность, которая часто используется в классических подходах [1-3]. В таких системах могут возникать обобщенные траектории, полная вариация которых не ограничена, однако их вариация конечна при некотором $\mathrm{p} > 1$ (в смысле определения Н. Винера [4]).

Большинство известных результатов по импульсно-траекторному расширению для данного класса систем ограничиваются случаем обобщенных траекторий с ограниченной полной вариацией, соответствующих импульсным воздействиям, описываемым ограниченными борелевскими мерами, и не охватывают указанную ситуацию. Отдельные результаты, касающиеся рассматриваемого случая, получены в работах [5–7]; настоящий доклад посвящен дальнейшему развитию этих исследований.

В докладе обсуждается взаимосвязь между теорией динамических систем, управляемых входными сигналами низкой регулярности (в зарубежной литературе известной как *rough path theory*), и математической теорией импульсного управления. Рассматривается понятие решения управляемой системы с векторными управлениями, обладающими ограниченной -вариацией при $1 < p < 2$, а также его конструктивное представление. Случай $\mathrm{p} = 2$ оказывается в определенном смысле пороговым: при $1 < \mathrm{p} < 2$ решение может быть описано с помощью прямого обобщения интеграла Лебега–Стилтьеса – интеграла Юнга. В то же время при $\mathrm{p} > 2$ для корректного описания решений требуется более тонкий, алгебраический подход, основанный на формальных рядах Чена и итерированных интегралах.

1. Гурман В. И. Принцип расширения в задачах управления. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Физматлит, 1997. 288 с.
2. Дыхта В.А. Вариационный принцип максимума и квадратичные условия оптимальности импульсных процессов. Иркутск: изд-во ИГЭА, 1994.
3. Дыхта В.А., Самсонюк О.Н. Оптимальное импульсное управление с приложениями. 2-е изд. М.: Физматлит, 2003.
4. Wiener N. The quadratic variation of a function and its Fourier coeficients // J. Math. Phys. 1924. Vol. 3. Pp. 72–94.
5. Самсонюк О.Н., Старицын М.В. Импульсные управляемые системы с траекториями ограниченной p-вариации // Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика. 2017. № 19. С. 164–177.
6. Goncharova E.V., Samsonyuk O.N., Staritsyn M.V. Dynamical systems with states of bounded p-variation: a new trend in impulsive control // Cybernetics and Physics. 2017. Vol. 6, no. 4. Pp. 208–214.
7. Goncharova E.V., Samsonyuk O.N., Staritsyn M.V. Rough paths theory and impulsive control: A promising connection // IFAC PapersOnLine. 2018. Vol. 51, no. 32. Pp. 615–618.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (номер гос. регистрации 121041300060-4).

ОБ ОБОБЩЕНИЯХ ПОЗИЦИОННОГО ПРИНЦИПА МИНИМУМА В.А. ДЫХТЫ*

О. Н. Самсонюк
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
olga.samsonyuk@icc.ru

Существенный вклад в развитие условий нелокальной оптимальности для задач оптимального управления внесен В.А. Дыхтой. Среди полученных им результатов особое место занимает позиционный принцип минимума (ППМ) – необходимое условие вариационного типа, которое усиливает принцип максимума Понтрягина и обобщает ряд известных условий оптимальности, применимых как к классическим, так и к негладким задачам со свободным правым концом траекторий [1, 2].

Формулировка ППМ опирается на классические элементы принципа максимума Понтрягина – гамильтониан, функцию Понтрягина и сопряженную систему, – и на специальный выбор функции φ, представляющей собой линейную, квазилинейную (с нелинейностью, зависящей от целевой функции) или квадратичную мажоранту для терминального функционала. Эта функция порождает семейство - экстремальных позиционных стратегий вместе с соответствующим множеством пучков конструктивных движений Красовского–Субботина и присоединенную задачу, лежащую в основе ППМ. В качестве функции φ В.А. Дыхта использовал суперрешения уравнения Гамильтона–Якоби, обладающие свойством слабой монотонности относительно управляемой системы. При выполнении дополнительных краевых условий они обеспечивают знакоопределенность приращения целевого функционала для исследуемого процесса задачи.

Общий позиционный принцип минимума допускает применение мажорант функционала произвольной структуры [2], что существенно расширяет сферу применимости подобных условий оптимальности. Вместе с тем универсальный метод построения нелинейных мажорант на сегодняшний день отсутствует. Значительный шаг в этом направлении сделан в работе [3], где показано отсутствие «подъема» – иными словами, наличие потенциального спуска – у решения линейного транспортного уравнения, построенного по заданному управлению и терминальной целевой функции.

В докладе обсуждаются некоторые обобщения результатов В.А. Дыхты и их распространения на задачи оптимального импульсного управления. Представленные результаты продолжают исследования, начатые в работах [4, 5].

1. Дыхта В.А. Нестандартная двойственность и нелокальные необходимые условия оптимальности в невыпуклых задачах оптимального управления // Автомат. и телемех. 2014. № 11. С. 19–37.
2. Дыхта В.А. Позиционный принцип минимума: вариационное усиление понятий экстремальности в оптимальном управлении // Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика. 2022. № 41. С. 19–39.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (номер гос. регистрации 121041300060-4).

3. Погодаев Н.И., Старицын М.В. Точные формулы приращения функционала и необходимые условия оптимальности, альтернативные принципу Понтрягина // Матем. сб. 2024. Т. 215, № 6 С. 77–110.
4. Dykhta V., Samsonyuk O. Optimality conditions with feedback controls for optimal impulsive control problems // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, no. 32. Pp. 509–514.
5. Samsonyuk O.N., Sorokin S.P., Staritsyn M.V. Feedback necessary optimality conditions for nonlinear measure-driven processes // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52, no. 16. Pp. 132–137.

О СЧЕТНОМ СЕМЕЙСТВЕ ДИСКРЕТНЫХ УРАВНЕНИЙ СО СВОЙСТВОМ ЛОРАНА*

А. К. Свинин
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
svinin@icc.ru

В последнее время значительный интерес проявляется к дискретным уравнениям на искомую функцию одной переменной, обладающих свойством Лорана. Наиболее известным бесконечным семейством подобных уравнений является множество билинейных (квадратичных) рекуррентных соотношений Гейла-Робинсона, среди которых находятся, в частности, хорошо известные уравнения Сомос-4 и Сомос-5. Эти уравнения определяют целочисленные последовательности, имеющие некоторый набор приложений [1-3]. Они обладают рядом характерных свойств, связывающих их с теорией чисел, теорией интегрируемости, теорией эллиптических кривых и кластерных алгебр.

Недавно мы нашли счетное линейно упорядоченное семейство дискретных уравнений, каждое из которых обладает свойством Лорана. Это свойство позволяет генерировать целочисленные последовательности, которые могут иметь комбинаторный смысл. Два первых уравнения в этом семействе это Сомос-4 и Сомос-5. Последующие уравнения не известны в литературе, однако они допускают редукцию к некоторым уравнениям Гейла-Робинсона.

Одним из свойств этих уравнений является то, что они погружаются в так называемую дискретную динамическую систему Мамфорда, которая была определена в недавней работе Хоуна, Робертса и Ванхекке [4].

В этой работе было введено так называемое отображение Вольтерра с помощью уравнения Лакса, которое выглядит аналогично представлению Лакса для непрерывной системы Мамфорда [8]. Это отображение оказывается бирациональным, и с ним связывается соответствующая динамическая система на аффинном пространстве M_g размерности $3\mathrm{g}+1$. Мы называем эту динамическую систему дискретной динамической системой Мамфорда. Дискретная динамическая система Мамфорда бирационально связана с некоторым дискретным уравнением порядка $2\mathrm{g}+1$, ассоциированым с разложением в цепную дробь Стилтьеса некоторой функции на гиперэллиптической (эллиптической) кривой рода $g \geq 1$. Авторы статьи [4] приводят примеры этого уравнения для случаев $\mathrm{g}=1$ и $\mathrm{g}=2$, но при больших значениях g соответствующее уравнение оказывается слишком громоздким для записи.

В работе [7], мы представляем подход, в котором упомянутое уравнение $(2\mathrm{g}+1)$-го порядка может быть записано для всех значений $g \geq 1$ в компактной форме. Оказывается, что это уравнение не является новым и может быть найдено в работе автора [6]. Существенным моментом в нашем подходе является использование специального класса дискретных многочленов [5], которые, как показано, тесно связаны с цепной дробью Стилтьеса. С одной стороны, это позволяет нам обобщить некоторые результаты работы [1]. С другой стороны, многие утверждения в этом подходе могут быть представлены в более компактной и унифицированной форме.

1. Buchholz R. H., Rathbun R. L., An infinite set of Heron triangles with two rational medians// Amer. Math. Monthly. 1997. V. 104. P. 107-115.

* Работа выполнена в рамках базового проекта 121041300058-1.

2. Eager R., Franco S. Colored BPS pyramid partition functions, quivers and cluster transformations// JHEP. 2012. V. 2012. 38.
3. Fordy A. P., March B. R. Cluster mutation-periodic quivers and associated Laurent sequences// J. Algebr. Comb. 2011. V. 34. P. 19-66.
4. Hone A. W., Roberts J. A. G., Vanhaecke P. A family of integrable maps associated with the Volterra lattice// Nonlinearity. 2024. V. 37. 095028, 65 pp.
5. Svinin A. K. On some class of reductions for the Itoh-Narita-Bogoyavlenskii lattice// J. Phys. A: Math. Theor. 2009. V. 42. 454021, 15pp.
6. Svinin A. K. On some classes of discrete polynomials and ordinary difference equations// J. Phys. A: Math. Theor. 2014. V. 47. 155201, 27 pp.
7. Svinin A. K. Volterra map and related recurrences //arXiv preprint arXiv:2502.06908. 2025.
8. Vanhaecke P. 2001 Integrable systems in the realm of algebraic geometry. Springer Science and Business Media.

О ПОДХОДАХ К ЧИСЛЕННОМУ РЕШЕНИЮ ЛИНЕЙНЫХ МНОГОМЕРНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА*

С. В. Свинина
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
svinina@icc.ru

В докладе рассматривается первая краевая задача для линейной многомерной дифференциально-алгебраической системы первого порядка:

$$A(x,t)\frac{\partial u}{\partial t} + B(x,t)u = f(x,t), \quad B(x,t) = \sum_{\propto=1}^{p} B_{\propto}(x,t)\frac{\partial}{\partial x_{\propto}} + C_{\propto}(x,t), \tag{1}$$

$$u(x,t_0) = \varphi(x), \quad u(x,t)|_{\partial S} = \omega(x,t), \quad 0 < t < T, \tag{2}$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_p),$$

с тождественно вырожденными в области определения квадратными матричными коэффициентами. Такие задачи возникают при описании процессов распространения внутренних волн и колебаний в газожидкостных системах [1]. Численное решение задач (1), (2) существенно отличается от решения краевых задач для классических многомерных систем. Вырождение матричных коэффициентов системы (1) создает проблему применимости к их решению классических численных методов. Например, аддитивные разностные схемы теряют свойство устойчивости, а локально-одномерные разностные схемы уже не аппроксимируют исходную задачу (1), (2). Поэтому для численного решения таких задач необходимы новые методы численного решения или новые подходы при построении разностных схем. Основная идея предлагаемого в докладе подхода численного решения задачи (1), (2) состоит в переходе от исходной задачи посредством замены дифференциального оператора $B(x,t)$ соответствующим разностным оператором $\overline{B_i}(t)$ к приближенной дифференциально-разностной задаче Коши для алгебро-дифференциальной системы:

$$\overline{A_i}(t)\frac{dy}{dt} + \overline{B_i}(t)y = g_i(t), \quad y(t_0) = \varphi_i. \quad i = (i_1, i_2, \dots, i_p). \tag{3}$$

Предполагая, что для системы из (3) существует левый регуляризирующий оператор (ЛРО) [2], [3] и его коэффициенты найдены, действуя на систему (3) ЛРО, осуществляется переход к дифференциально-разностной задаче Коши в нормальной форме:

$$\frac{dy}{dt} + D_i(t)y = G_i(t), \quad y(t_0) = \varphi_i. \quad i = (i_1, i_2, \dots, i_p). \tag{4}$$

Особенность задачи (4) состоит в том, что вектор-функция $G_i(t)$ содержит производные от искомой функции на границе области определения до порядка k включительно, где k- индекс алгебро-дифференциальной системы из (3). Несмотря на эту особенность, для численного решения задачи (4) можно применять, например, векторные аддитивные разностные схемы [4], [5] или локально-одномерные разностные схемы [6], которые вполне эффективны при численном решении классических многомерных систем.

* Работа выполнена в рамках базового проекта: «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» № 121041300060-4.

1. Габов С.А., Свешников А.Г. Линейные задачи нестационарных внутренних волн. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 344 с.
2. Чистяков В.Ф. Алгебро-дифференциальные операторы с конечномерным ядром. – Новосибирск: Наука, 1996. – 278 с.
3. Чистяков В.Ф., Щеглова А.А. Избранные главы теории алгебро-дифференциальных систем. – Новосибирск: Наука, 2003. – 320 с.
4. Абрашин В.Н. Об одном варианте метода переменных направлений решения многомерных задач математической физики I // Дифференциальные уравнения. 1990. Т.26. С. 314-323.
5. Вабищевич П.Н. Аддитивные операторно-разностные схемы (схемы расщепления). – М.: КРАСАНД, 2013. – 464 с.
6. Самарский А.А. Об одном экономичном разностном методе решения параболического уравнения в произвольной области // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1962. Т.2, № 5. С. 787-811.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ИНТЕГРИРОВАННОМ ОКИСЛИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ

Сон Ён Бом, Им Гум Рён, Ан Сон Чхор
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
hci83109@star-co.net.kp

1. Введение. Интегрированный окислительный канал (integrated oxidation ditch)имеет преимущества такие, как низкая площадь, низкая эксплуатационная стоимость оборудования, высокая эффективность очистки сточных вод и т. д. по сравнению с обычными методами активного ила, и поэтому в настоящее время широко применяется для очистки сточных вод в городах и поселках [1].

Поскольку очистные станции сточных вод различаются по качествам сточных воды, уровням технических оборудований и условиям окружающей среды и методам эксплуатации , очень важно выбрать эксплуатационные параметры в научных и целесообразных началах и регулировать процесс очистки сточных воды с учётом характеристик конкретных объектов.

В статье мы экспериментально исследовали влияние параметров на удаление загрязняющих веществ в интегрированном окислительном канале с производительностью 3 тыс. $м^3$/сут, которая построена в жилых районах, где средняя температура зимой составляет менее ниже минус 20°C, и обеспечивали практическую основу для эксплуатации очистных сооружений.

2. Анализ объекта и данные характеристик очистого процесса

Учитывая температурные условия северного высокогорного региона, интегрированный окислительный канал построен внутрикомнатным, а блок-схема станции очистки сточных вод показана на рис. 1.

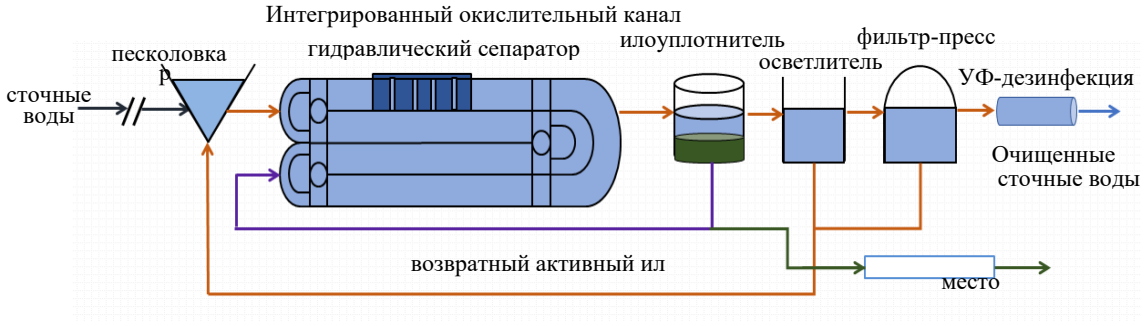


Рисунок 1. Блок-схема станции очистки сточных вод

Поступающая сточная вода типична для муниципальной, в таб. 1 представленны исходные данные.

Табица 1 – Исходные концентрации загрязнений и её сред в сточных водах, поступающих на очистку и нормативы по сбросу очищенной сточной воды

Показатель	Взвешенные вещества(SS) (мг/л)	ХПК (COD) (мг/л)	NH_4^+-N (мг/л)	Общий Азот (TN) мг/л	Общий Фосфор (TP) (мг/л)
Диапазон вариации	100~1000	100~700	15~100	30~110	0.25~5
Сред.	300	320	50	60	3
Норматив по сбросу	30	120	5	8	1

Интегрированный окислительный канал включает три подводных пропеллента и микрополочные воздушные клапаны, а также регулирует концентрацию растворенного кислорода с помощью мотора с преобразователем частоты. В интегрированном окислительном канале установлены измерительные приборы для измерения параметров процесса очистки сточных вод таких, как температура(T), Кислотность (pH), взвешенные вещества (SS), концентрацию растворенного кислорода(DO), ХПК(COD), общий азот(TN), общий фосфор(TP), доза ила (MLSS), окисли тельно-восстановительный потенциал (ORP), расход, также построенны АСУ ТП(SCADA) и реализовали мониторинг процесса очистки сточных вод. Станция начала работать с января 2022 года, после экспериментального периода 6 месяцев , приступала в нормальную эксплуатацию, используя АСУ ТП, собраны данные процесса очистки сточных вод, результаты суммированы в таблице 2. Данные, используемые в этой статье, являются средними значениями данных, собранными в течение 1-летнего нормального периода работы в интегрированном окислительном канале.

Таблица 2 – Основные параметры процесса очистки сточных вод

Параметры	Значение
Доза ила (MLSS) (мг/л)	3000-4000
Пропорция возвратного активного ила(%)	50-70
Концентрация растворенного кислорода (DO) (мг/л)	2.0-3.0
Окислительно-восстановительный потенциал (ORP) анаеробной зоны (мв)	≦-100
Органическая нагрузка (F/M) (кг БПК5(к г, доза ила.сут))	0.01-0.2
Объемный коэффициент активного ила (SVI)	30-90
ХПК/ общий азот(COD/TN)	> 8
БПК5/ общий фосфор(BOD5/TP)	> 15
Гидравлическое время пребывания (HRT) (час)	10-20
Возраст ила(SRT)(сут)	> 15

3. Исследование для определения оптимальных эксплуатационных параметров в интегрированной окислительной канале.

3.1. Исследование влияния активной органической нагрузки иловой смеси F/M на удаление загрязняющих веществ.

В процессах биологической очистки сточных вод, многие факторы как доза ила (MLSS),концентрация растворенного кислорода(DO), органическая нагрузка иловой смеси (F/M), объемный коэффициент активного ила (SVI), ХПК/ общий азот (COD/TN), БПК$_5$/ общий фосфор(BOD$_5$/TP), гидравлическое время пребывания (HRT), возраст ила (SRT)влияют на процесс очистки [2,3,4].

Среди них, органическая нагрузка иловой смеси F/M имеет особое значение, потому что он используется в качестве важного параметра управления биологическими процессами очистки сточных вод.

Мы исследовали эффективность удаления COD, NH_4^+-N и TP в сточной воде, изменив величины F/M в диапазоне от 0.01 до 0.2 и определили подходящий диапазон параметров F/M для нормальной эксплуатации интегрированного окислительного канала. Характеристики изменения коэффициентов удаления COD, NH_4^+-N и TP при разных значениях F/M показаны на Рис . 2.

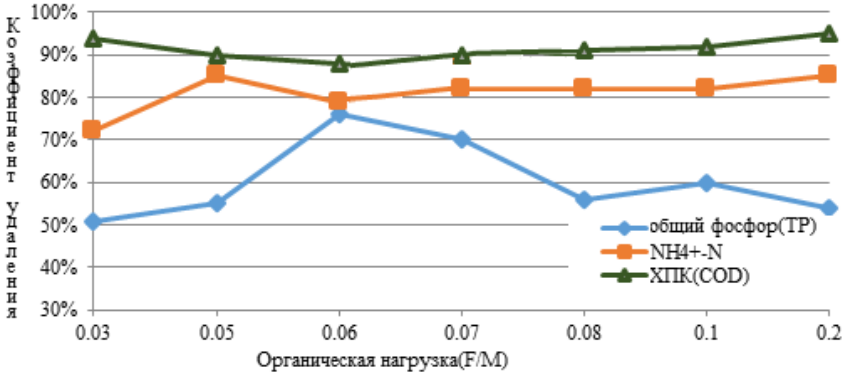


Рис. 2. Коэффициент удаления COD, NH4+ -N и TP с изменением F / M.

Когда F/M составляет от 0.03 до 0.06, эффективность удаления COD, NH_4^+-N и TP относительно велико, и когда F/M составляет 0.06-0.07, коэффициент удаления COD, NH_4^+-N был сравнительно высоким, и коэффициент удаления TP был приблизительно 70%. Можно видеть, что при F/M около 0.08, коэффициент удаления COD, NH_4^+-N можно обеспечить свыше 80 %, но уровень коэффициента удаления TP уменьшается ниже 70 %. В результате с точки зрения удаления органического вещества, аммиака и фосфора разумно, что в интегрированном окислителином канале значение F/M обеспечивалось около 0.08. К тому времени коэффициент удаления составляет более 80 % для всех показателей.

3.2. Исследование эффектов удаления SS в гидравлическом сепараторе (solid-liquid separator).

В интегрированном окислителином канале, гидравлический сепаратор играет очень важную роль для удаления SS. Мы исследовали влияние объемного коэффициента активного ила SVI и дозы ила MLSS на удаление взвешенных веществ SS, результаты показаны на рис. 3 и 4 соответственно.

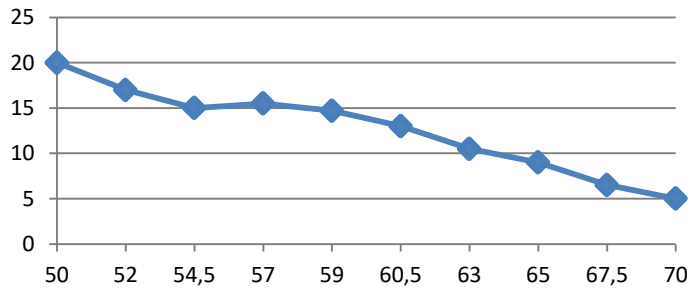


Рисунок 3. Влияние объемного коэффициента активного ила SVI на удаление взвешенных веществ SS

Как показано на рис. 3, в нормальных условиях эксплуатации значение SVI в основном держится от 50 до 70, а SS достигает стандартных значений и показал хороший эффект удаления SS в гидравлическом сепараторе.

На рис. 4 показано, что когда доза ила MLSS варьируется в диапазоне 3000 мг/л-4000 мг/л, тогда значение взвешенных веществ SS поддерживается меньше 20 мг/л.

Хотя во время нормальной работы качество сточных вод постоянно изменялось, гидравлический сепаратор показал очень сильную адаптируемость.

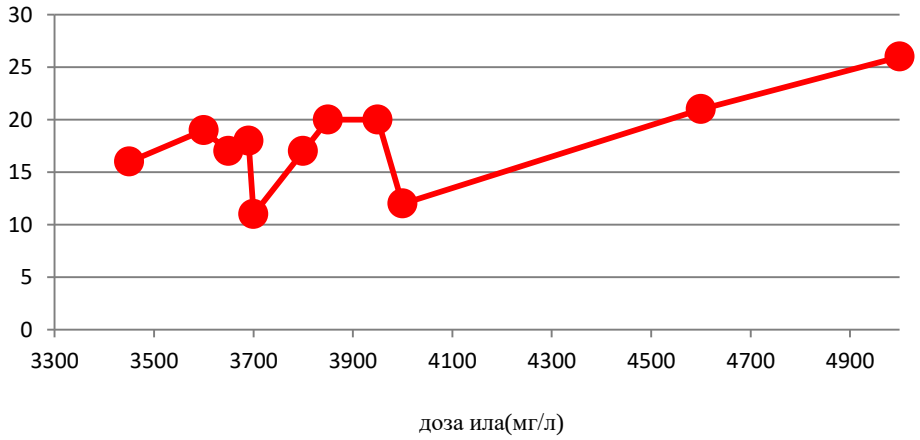


Рисунок 4. Влияние дозы ила MLSS на удаление взвешенных веществ SS.

4. Заключение. Мы исследовали влияние параметров F/M,SVI, MLSS на эффективность очистки сточных вод в одном интегрированном окислительном канале и обеспечили практическую основу для эксплуатации станции путем определения разумного диапазона рабочих параметров.

1. Е.И. Пупырев . Сбор и очистка хозяйственно-бытовых сточных вод: критический обзор достигнутых результатов. Безопасность строительства и городского хозяйства. УДК 628.3 DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1365-1407.
2. Чан Ха Куан, Е.С. Гогина. Методы реконструкции и модификации реактора периодического действия станций очистки сточных вод во Вьетнаме. Гидравлика. Геотехника. Гидротехническое строительство. УДК 628.3 DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.589-602.
3. Liu, Y. Shi, H. Wang, Z. Fan, L. Shi, H. Approach to enhancing nitrogen removal performance with fluctuation of influent in an oxidation ditch system. Chem. Eng. J. 2013, 219, 520–526.
4. Dong Xi . Rapid aerobic sludge granulation in an integrated oxidation ditch with two zone clarifiers. Water Research .175(2020)115704.

О ПРИМЕНЕНИИ АЛГОРИТМОВ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА МОРСА*

П. С. Сороковиков
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
pavel@sorokovikov.ru

В последние десятилетия разработка численных методов нелокальной оптимизации стала одним из приоритетных направлений в области вычислительной математики и прикладной информатики. На сегодняшний день предложено значительное число алгоритмов, отличающихся как принципами построения, так и вычислительными характеристиками. Среди них особое внимание исследователей привлекают метаэвристические методы, основанные на моделировании природных процессов и коллективного поведения, включая алгоритмы роевого интеллекта [1, 2].

В настоящее время продолжает возрастать интерес к проблеме получения сверхмелкодисперсных структур атомно-молекулярных кластеров. Цель подобных исследований заключается в нахождении кластерной структуры с минимальной потенциальной энергией. Многие задачи поиска низкопотенциальных состояний атомно-молекулярных кластеров заключаются в минимизации невыпуклых функций, характеризуются чрезвычайно быстрым увеличением количества локальных экстремумов с ростом числа переменных. В работе рассматривается задача дискретной минимизации потенциала Морса [3], представляющего собой целочисленную мультимодальную функцию:

$$f(x)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=i+1}^{N}\exp\left[\rho\left(1-r_{ij}\right)\right]\left(\exp\left[\rho\left(1-r_{ij}\right)\right]-2\right)\to\min,\ r_{ij}=\sqrt{\sum_{k=1}^{3}\left(x_{3(i-1)+k}-x_{3(j-1)+k}\right)^2},$$

где N – количество атомов, r_{ij} – расстояние между атомами, $\rho=3$ – параметр задачи. Размерность задачи составляет трехкратное количество от числа атомов $n=3N$.

В качестве алгоритмов роевого интеллекта для оптимизации потенциала Морса в работе использовались методы «роя частиц», «колонии пчёл», «роя светлячков», «стаи серых волков» и «обучения-преподавания» (см., напр., [1, 2]). **Алгоритм «роя частиц» (**Particle Swarm Optimization, **PSO)** имитирует коллективное поведение стаи, где частицы обновляют своё положение в пространстве поиска, ориентируясь на собственный опыт и лучший результат соседей. **Алгоритм «колонии пчёл» (***Artificial Bee Colony***, ABC)** основан на моделировании пищевого поведения медоносных пчёл, разделённых на группы разведчиц, работниц и наблюдателей. Алгоритм «роя светлячков» (Firefly Algorithm, FA) воспроизводит поведение популяции светлячков, где интенсивность свечения определяет привлекательность особей и направление поиска. Алгоритм «стаи серых волков» (Grey Wolf Optimizer, GWO) моделирует иерархическую структуру стаи волков и процесс коллективной охоты, отражающий баланс разведки и эксплуатации. Алгоритм «обучения-преподавания» (Teaching-Learning-Based Optimization, TLBO) использует метафору образовательного процесса, где взаимодействие между преподавателем и обучающимися направляет процесс поиска оптимального решения.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№º гос. регистрации: 121041300060-4).

Вышеуказанные алгоритмы были модифицированы для решения дискретных задач реализованы на языке C (GCC \ MinGW) с применением единых программных стандартов и исследованы на атомно-молекулярных кластерах размерностей от 5 до 50 атомов (от 15 до 150 переменных). Сравнивались вычисления, выполненные каждым из пяти алгоритмов роевого интеллекта. В табл. 1 представлены результаты тестирования алгоритмов. Единым критерием остановки для всех алгоритмов было превышение $8 \cdot 10^6$ обращений к оракулу нулевого порядка. Число особей в популяциях для всех алгоритмов было выбрано равным 50. Первый столбец табл. 1 соответствует количеству атомов в кластерах Морса, столбцы со 2 по 6 содержат найденные значения потенциальной функции каждым из алгоритмов, а в седьмом столбце указаны наилучшие из известных значения потенциала Морса в дискретной постановке.

Таблица 1 – Результаты тестирования алгоритмов

N	PSO	ABC	FA	GWO	TLBO	Best known
5	2.113652	2.113652	2.113652	2.113652	2.113652	2.113652
10	7.285730	14.170022	7.285730	9.836225	7.285730	7.285730
15	18.345563	37.998380	18.345563	21.617431	18.345563	18.345563
20	29.789468	68.010195	29.481441	49.461809	29.789468	29.481441
25	44.780209	102.529507	43.915358	80.669393	42.857675	42.857675
30	63.358927	135.404635	60.281458	127.726697	60.642991	60.281458
35	90.534974	172.022412	80.295575	159.657257	79.202250	78.313136
40	114.313772	211.335995	98.461457	201.251893	98.650877	98.458497
45	150.102888	254.077751	123.041571	256.484619	121.079505	121.079505
50	176.037206	290.102919	143.391078	299.166429	141.702750	140.582616

На рис. 1 показаны зависимости найденных значений потенциала Морса от количества атомов. Проведённые вычислительные эксперименты показали, что среди рассмотренных алгоритмов на лидирующих позициях находятся **FA** и **TLBO**, характеризующиеся сопоставимым уровнем эффективности. Алгоритм **PSO** продемонстрировал результаты несколько хуже, чем **FA** и **TLBO,** в то время как **GWO** и **ABC** показали наименее конкурентоспособные результаты по сравнению с остальными методами.

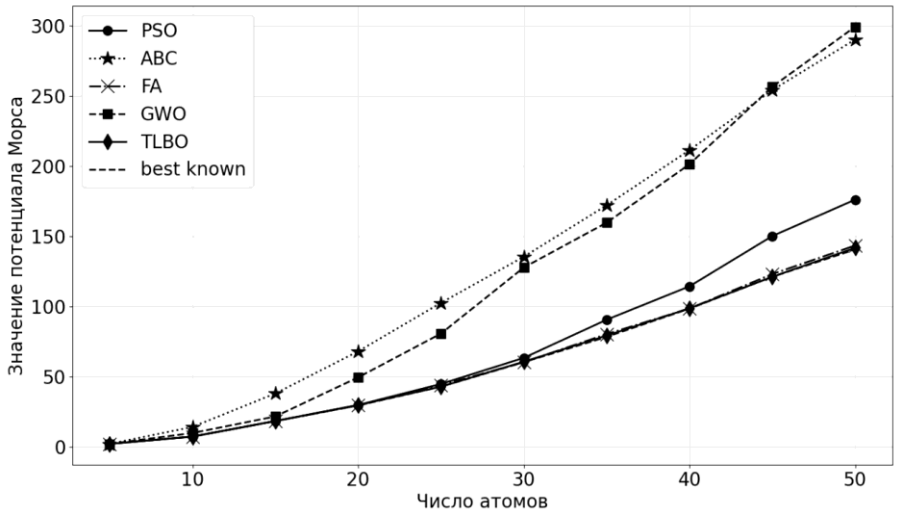


Рисунок 1. Зависимости найденных значений потенциала Морса от числа атомов

1. Jakšić Z., Devi S., Jakšić O., Guha K. A comprehensive review of bio-inspired optimization algorithms including applications in microelectronics and nanophotonics // Biomimetics. 2023. Vol. 8, No. 3. P. 278.
2. Xing B., Gao W.J. Innovative computational intelligence: a rough guide to 134 clever algorithms. Cham: Springer, 2014. 451 p.
3. The Cambridge Energy Landscape Database. URL: http://www-wales.ch.cam.ac.uk/CCD.html.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АЛГОРИТМА ЯСТРЕБОВ ХАРРИСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ НЕПРЕРЫВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ*

П. С. Сороковиков
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
pavel@sorokovikov.ru

Проблема поиска глобального оптимума невыпуклой многоэкстремальной функции продолжает оставаться одной из самых трудных в теории оптимизации и в практических приложениях. Исследования по созданию численных методов нелокальной оптимизации ведутся достаточно активно в последние годы. В наши дни специалистами предложено существенное количество поисковых алгоритмов различного типа, каждый из которых имеет свои вычислительные характеристики. Одними из таких алгоритмов являются метаэвристики, «инспирированные природой» (см., напр., [1, 2]), рост популярности которых связан с увеличением мощностей вычислительной техники и необходимостью решения оптимизационных задач большой размерности.

Алгоритм ястребов **Харриса (Harris Hawks Optimizer, HHO)** [3–5] представляет собой современный метаэвристический метод нелокальной оптимизации, основанный на моделировании коллективного поведения ястребов Харриса во время охоты. Алгоритм имитирует стратегию неожиданного нападения на добычу, где хищники используют как кооперативные, так и индивидуальные тактики. В процессе поиска оптимума популяция агентов (ястребов) взаимодействует с «добычей», положение которой соответствует потенциальному решению задачи. Алгоритм сочетает две фазы: разведки (exploration) и атаки (exploitation). Фаза разведки заключается в том, что ястребы случайным образом исследуют пространство решений, имитируя наблюдение и выслеживание добычи. При сближении с жертвой во время фазы атаки ястребы применяют разные сценарии нападения (мягкая или жёсткая осада, динамические прыжки), что обеспечивает баланс между локальным уточнением решения и глобальным поиском. Работа посвящена численному исследованию свойств алгоритма **HHO** путем проведения многовариантных вычислительных экспериментов на мультимодальных задачах непрерывной оптимизации из области атомно-молекулярного моделирования.

Рассматривается проблема поиска глобального минимума невыпуклой функции с параллелепипедными ограничениями:

$$f(x) \to \min,\ x \in B,\ B = \left\{ x \mid x = (x_1, x_2, ..., x_n),\ \alpha_i \le x_i \le \beta_i,\ i = \overline{1,n} \right\}.$$

В качестве тестовых примеров рассмотрены многоэкстремальные задачи поиска низкоэнергетических состояний атомно-молекулярных кластеров, сводящиеся к минимизации потенциальных функций – специальных моделей. **Множественность локальных** оптимумов рассматриваемых функций экспоненциально возрастает с увеличением размерности пространства, что является ценным свойством при исследовании алгоритмов глобального поиска. Некоторые из тестовых оптимизационных задач приведены ниже.

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№º гос. регистрации: 121041300060-4).

1. Потенциал Морса:

$$f(x)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=i+1}^{N}\exp\left[\rho\left(1-r_{ij}\right)\right]\left(\exp\left[\rho\left(1-r_{ij}\right)\right]-2\right),\ r_{ij}=\sqrt{\sum_{k=1}^{3}\left(x_{3(i-1)+k}-x_{3(j-1)+k}\right)^2},\ \rho=3.$$

2. Потенциал Гупты для цинковых кластеров:

$$f(x)=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\left[A\sum_{j\neq i}\exp\left[-p\left(\frac{r_{ij}}{r_0}-1\right)\right]-\sqrt{\sum_{j\neq i}\exp\left[-2q\left(\frac{r_{ij}}{r_0}-1\right)\right]}\right],$$

$$r_{ij}=\sqrt{\sum_{k=1}^{3}\left(x_{3(i-1)+k}-x_{3(j-1)+k}\right)^2},\ A=0.1477,\ p=9.689,\ q=4.602,\ r_0=1.0.$$

Здесь N – количество атомов, $n=3N$, r_{ij} – расстояние между атомами.

Численное исследование свойств алгоритма **HHO,** реализованного на языке C (GCC \ MinGW), производилось на задачах размерностей от 5 до 50 атомов (от 15 до 150 переменных). Единым критерием остановки алгоритма являлось превышение $8\cdot10^6$ вызовов оракула нулевого порядка. Алгоритм каждый раз запускался в двух вариантах, с различным размером популяции: 50 и 100 особей. В табл. 1 представлены результаты тестирования алгоритма: 1 столбец – число атомов N; 2 столбец – размерность задачи $n=3N$; 3, 4 столбец – найденное значение потенциала Морса алгоритмом с 50 и 100 поисковыми агентами; 5 столбец – наилучшее из известных значение потенциала Морса; 6, 7 столбец – найденное значение потенциала Гупты алгоритмом с 50 и 100 особями в популяции; 8 столбец – наилучшее из известных значение потенциала Гупты.

Алгоритм демонстрирует точное совпадение найденных значений с наилучшими известными результатами для кластеров Морса размерностей до 25 атомов (75 переменных) и Гупты размерностей до 10 атомов (30 переменных). При превышении указанных размерностей наблюдается отклонение от оптимального значения. Увеличение размера популяции с 50 до 100 агентов в большинстве случаев улучшает качество решения. Выполненные вычислительные эксперименты продемонстрировали работоспособность алгоритма **HHO**, по крайней мере, для вышеописанных условий.

Таблица 1 – Результаты тестирования алгоритма **ястребов Харриса**

N	n	Значение потенциала Морса			Значение потенциала Гупты		
		50 особей	100 особей	Best known	50 особей	100 особей	Best known
5	15	-9.299500	-9.299500	-9.299500	-6.422287	-6.422287	-6.422287
10	30	-31.519768	-31.519768	-31.519768	-13.055156	-13.055156	-13.055156
15	45	-63.162119	-63.162119	-63.162119	-19.533346	-19.546489	-19.697479
20	60	-97.417393	-97.417393	-97.417393	-26.160036	-26.235960	-26.395373
25	75	-134.649350	-136.072704	-136.072704	-32.556306	-32.618025	-33.075590
30	90	-176.231757	-176.940767	-177.578647	-38.531344	-39.024656	-39.768212
35	105	-220.151616	-220.826489	-221.771452	-44.936350	-45.271954	-46.472931
40	120	-262.975632	-263.877721	-268.394773	-50.627667	-51.063415	-53.182148
45	135	-307.889750	-309.759591	-318.660653	-57.293735	-57.624368	-59.895318
50	150	-359.884226	-361.416501	-366.635589	-64.025627	-64.212310	-66.601903

1. Xing B., Gao W.J. Innovative computational intelligence: a rough guide to 134 clever algorithms. Cham: Springer, 2014. 451 p.
2. Devika G., Karegowda A.G. Bio-inspired optimization: algorithm, analysis and scope of application // Swarm Intelligence-Recent Advances and Current Applications. 2023. P. 1–37.

3. Heidari A.A. et al. Harris hawks optimization: Algorithm and applications // Future Generation Computer Systems. 2019. Vol. 97. P. 849–872.
4. Alabool H.M. et al. Harris hawks optimization: a comprehensive review of recent variants and applications // Neural Computing and Applications. 2021. Vol. 33, No. 15. P. 8939–8980
5. Shehab M. et al. Harris hawks optimization algorithm: variants and applications // Archives of Computational Methods in Engineering. 2022. Vol. 29, No. 7. P. 5579–5603.

АРХИТЕКТУРА ИНТЕГРАЦИИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ СЦЕНАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЦИФРОВЫЕ СЕРВИСЫ ГЕОПОРТАЛА ИДСТУ СО РАН*

А. Б. Столбов, Р. К. Фёдоров
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
stolboff@icc.ru, fedorov@icc.ru

Предоставление сервисов сценарного моделирования является важным направлением развития информационной инфраструктуры научных исследований. Комплексные модели природных и антропогенных процессов требуют не только вычислительных ресурсов, но и согласованной среды для взаимодействия между модулями, данными и пользователями.

В настоящее время в ИДСТУ СО РАН ведётся разработка цифровой платформы сценарного моделирования, одной из функций которой будет являться включения вычислительных сервисов в геопортал [1], предоставляющий доступ к пространственным данным (на примере Байкальской природной территории). Основная задача – обеспечить возможность унифицированного вызова вычислительных модулей через веб-интерфейс, их контейнеризацию в среде Docker и регистрацию в геопортале как WPS-сервисов. Предложенная архитектура направлена на сокращение трудозатрат разработчиков, обеспечение совместимости данных и повышение воспроизводимости сценарных экспериментов.

Базовый алгоритм подготовки программного средства к включению в геопортал включает следующие этапы:

1. **Адаптация программного модуля**. Разработчик подготавливает исполняемый модуль, который можно запускать из командной строки с заданными входными и выходными параметрами. Входы могут представлять собой файлы (GeoTIFF, NetCDF, json) или значения параметров, а выходы — файлы результатов или визуализации.

2. **Формирование WPS-интерфейса**. Создаётся Python-класс, наследующий pywps.Process, где описываются входные и выходные параметры. При этом специальный метод _handler выполняет чтение входных данных, вызов основного алгоритма и формирование выходного файла.

3. **Контейнеризация**. Создаётся Dockerfile, содержащий базовый образ (например, python:3.11), установку зависимостей (pywps, gdal, flask, numpy и др.) и команду запуска сервиса. После локальной проверки образ передаётся в инфраструктуру геопортала.

4. **Регистрация в геопортале**. В каталоге геопортала прописывается новая точка доступа WPS и его метаданные (идентификатор, описание входов/выходов, ограничения, форматы).

5. **Передача подготовленного Docker-образа в геопортал**. Передача подготовленного Docker-образа выполняется через централизованный репозиторий контейнеров. При необходимости осуществляется тестовый запуск сервиса через веб-

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

интерфейс или REST-запрос. При обращении пользователя к WPS сервису геопортал инициирует запуск контейнера, передаёт входные данные и возвращает результат.

Для автоматизации этапов 1-3 может использоваться информационная система о математических моделях окружающей среды [2], использующая принципы компонентного моделирования [3]. В этом случае сервис дополнительно описывается в виде метазаписи, включающей: 1) список входных и выходных параметров, их типы и форматы; 2) описание параметров в терминах содержательной информационной модели [4]; 3) связи между параметрами и зависимость от контекста моделирования. На основе таких описаний система автоматически формирует прототип кода PyWPS-процесса и конфигурацию Docker, а также позволяет обрабатывать специальный информационный объект для контроля текущего состояния процесса сценарного моделирования.

Рассмотренный алгоритм интеграции в настоящее время тестируется на примере гидродинамической модели речного стока MOSART (Model for Scale Adaptive River Transport) [5], реализующей расчёт распространения стока по иерархической системе водосборов. Основное внимание уделяется этапам выделения исходного цифрового рельефа местности (DEM) с использованием возможностей геопортала и его обработки сервисами с целью построение гидрографической сети.

Таким образом, предложенная архитектура интеграции программных средств сценарного моделирования в геопортал ИДСТУ СО РАН обеспечивает доступный для широкого круга исследователей единый современный технологический контур для взаимодействия вычислительных модулей, пространственных данных и пользователей.

1. Feoktistov A., Gorsky S., Kostromin R., Fedorov R., Bychkov I. Integration of web processing services with workflow-based scientific applications for solving environmental monitoring problems, ISPRS International Journal of Geo-Information (2022). Vol. 11, № 1 DOI: 10.3390/ijgi11010008
2. Столбов А.Б. Разработка информационной системы о математических моделях окружающей среды, поддерживающих открытые стандарты моделирования // Материалы VI Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2024), 1-5 июля, 2024, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024. С.34-38.
3. Столбов А.Б., Павлов А.И., Лемперт А.А. О проектировании потока работ в платформе создания систем, основанных на знаниях // Материалы V Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2023), 3-7 июля, 2023, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2023. С.82-87.
4. Лемперт А.А., Столбов А.Б., Козлов В.В. Использование онтологического подхода для интеллектуальной поддержки сценарного моделирования водных объектов Приангарья, Информационные и математические технологии в науке и управлении 19 (2020) 14–24. doi: 10.38028/ESI.2020.19.3.002.
5. Thurber et al. Mosartwmpy: A Python implementation of the MOSART-WM coupled hydrologic routing and water management model, Journal of Open Source Software 6 (2021) 3221. https://doi.org/10.21105/joss.03221

СЦЕНАРИИ ИМПОРТА ДАННЫХ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ СТАНДАРТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Б. Столбов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
stolboff@icc.ru

Комплексное моделирование окружающей среды требует интеграции разнообразных источников данных, включая результаты дистанционного зондирования, наблюдений за объектами и экспертные оценки. Эффективность моделирования во многом определяется качеством подготовки и импорта данных, которые должны быть согласованы по формату, структуре и содержательному смыслу. В современных условиях растет потребность в автоматизированных и воспроизводимых процедурах импорта данных, основанных на открытых стандартах моделирования и совместимых с инфраструктурами научных вычислений. Настоящая работа направлена на формализацию и программную реализацию процессов импорта и подготовки данных для комплексного исследования с использованием подходов компонентно-ориентированного моделирования и принципов семантического аннотирования.

Теоретической основой рассматриваемого подхода является концептуальная модель компонентно-ориентированного сценарного моделирования (КМ КОСМ) [1], а в качестве программных средств системы проектирования сценариев импорта используются модули разрабатываемой платформы создания систем, основанных на знаниях [2, 3]. Под сценарием импорта данных в исследовании понимается совокупность операций по извлечению, преобразованию и аннотированию исходных ресурсов в соответствии с требованиями вычислительной модели (модель-компонент) и реализованных с использованием специального вида сервисов (сервисы-данных). Эти сервисы выполняют загрузку, валидацию, предобработку и экспорт данных в целевые форматы (GeoTIFF, NetCDF, JSON, объекты программных библиотек и др.) с заданной содержательной структурой, а их интерфейсы описываются в терминах универсальной информационной модели и аннотируются в программной платформе.

К основным отличительным особенностям предлагаемых сценариев импорта относятся следующие возможности:

1. Описание процесса импорта в форме платформенно-независимого потока работ проблемно-ориентированных методов, который должен быть специализирован конкретными сервисами-данных.

2. Содержательная интерпретация параметров (входы, выходы, опции настройки) проблемно-ориентированных методов и сервисов-данных в соответствии с универсальной метамоделью <Характеристика, Шкала, Значение>.

3. Применение специальных поддерживаемых внутри платформы типов значений метамодели для описания типа файлов разного формата, программных объектов библиотек и внешних справочников.

4. Использование сервисами-данных специального объекта, которых хранит всю необходимую информацию о многоэтапном процессе импорта, начиная от сырых данных до целевого формата компонента-модели.

5. Автоматическая генерация исполняемого кода, реализующая сценарий.

Рассмотрим иллюстративный пример на основе этапов процесса импорта по подготовке цифровой модели рельефа для применения гидродинамической модели MOSART (Model for Scale Adaptive River Transport) [4]. Алгоритм, выполняемый

экспертом в моделировании при участии программиста, для описания программных средств устранения плоских участков (необходимо при формировании непрерывного речного стока), состоит из следующих шагов:

1. Определить список ресурсов или сущностей (проблемных и предметных), которые необходимо обрабатывать для решения задачи, и при необходимости добавить их в универсальную метамодель <Характеристика, Шкала, Значение>: *цифровая модель рельефа*, *состояние цифровой модели рельефа*.

2. Добавить в существующую иерархию характеристик и значений сущности для хранения данных о подпроцессе импорта: 1) *состояние процесса моделирования*; 2) *состояние процесса подготовки данных*; 3) *состояние цифровой модели рельефа*; 4) *наличие плоских участков в цифровой модели рельефа* (со значением «истина/ложь»).

3. Выбрать или добавить описание файлов, в которых может хранится обрабатываемая сущность: 1) *DEM* (*Digital Elevation Model*); 2) *растровый файл*; 3) *GeoTIFF*.

4. Создать проблемно-ориентированные методы вместе с их интерпретацией: 1) *загрузка DEM*; 2) *устранение плоских участков в DEM*.

5. Выбрать или добавить описание программных объектов, использующихся в сервисах-данных: 1) *ndarray* из *numpy*; 2) *Raster* из *pysheds* [5].

6. Добавить описание сервисов-данных вместе с их интерпретацией: 1) загрузка DEM для библиотеки Pysheds; 2) устранение плоских участков «pits»; 3) устранение плоских участков «depressions»; и др.

7. Сформировать поток работ, задающий сценарий для подпроцесса импорта в терминах проблемно-ориентированных методов, выбрать какие сервисы-данных будут использованы при реализации и сгенерировать исполняемый код для целевой платформы: *python* (локально) или *PyWPS, Docker* (для геопортала ИДСТУ СО РАН).

В заключение необходимо отметить, что предложенный подход формализует и автоматизирует процесс подготовки и интеграции данных, применимый не только в задачах комплексного исследования окружающей среды, но и при проектировании сценариев анализа сложных объектов, повышая согласованность, качество и воспроизводимость процедур импорта.

1. Лемперт А.А., Столбов А.Б., Козлов В.В. Использование онтологического подхода для интеллектуальной поддержки сценарного моделирования водных объектов Приангарья, Информационные и математические технологии в науке и управлении 19 (2020) 14–24. doi: 10.38028/ESI.2020.19.3.002.
2. Столбов А.Б., Павлов А.И., Лемперт А.А. О проектировании потока работ в платформе создания систем, основанных на знаниях // Материалы V Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2023), 3-7 июля, 2023, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2023. С.82-87.
3. Столбов А.Б. Разработка информационной системы о математических моделях окружающей среды, поддерживающих открытые стандарты моделирования // Материалы VI Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред (ICCS-DE 2024), 1-5 июля, 2024, Иркутск, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024. С.34-38.
4. Thurber et al. Mosartwmpy: A Python implementation of the MOSART-WM coupled hydrologic routing and water management model, Journal of Open Source Software 6 (2021) 3221. https://doi.org/10.21105/joss.03221
5. Pysheds – Simple and fast watershed delineation in python, 2025. URL: https://mattbartos.com/pysheds/.

ЛОКАЛЬНЫЙ ПОИСК В НЕВЫПУКЛЫХ ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ*

А. С. Стрекаловский, Н. О. Косьянов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
strekal@icc.ru, kosyanov.nik@gmail.com

Рассмотрим линейную (по состоянию $x(t)$, $t \in T$) систему управления ($T =]t_0, t_1[$, $x(t) = x(t,u)$, $t \in T$)

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(u(t),t) \ \ \mathring{\forall} t \in T, \qquad x(t_0) = x_0. \tag{1}$$

$$u(\cdot) \in \mathcal{U} := \left\{ u(\cdot) \in L_\infty^r(T) \mid u(t) \in U \ \ \mathring{\forall} t \in T =]t_0, t_1[\right\}. \tag{2}$$

Целевой функционал и задача оптимального управления заданы в следующем виде:

$$(\mathcal{P}): \qquad J(u) := \varphi_1\big(x(t_1,u)\big) + \int_T \varphi(x(t,u),u(t),t)\, dt \downarrow \min_u, \ \ u(\cdot) \in \mathcal{U}, \tag{3}$$

$$\left.\begin{array}{c} \varphi_1(x) = g_1(x) - h_1(x) \\ \varphi(x,u,t) = g(x,t) - h(x,t) + f(u,t); \end{array}\right\} \tag{4}$$

где функции g_1,h_1: $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, выпуклы на $\mathbb{R}^n$, а $g(\cdot,t)$, $h(\cdot,t)$: $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ выпуклы на $\mathbb{R}^n \ \forall t \in T$, так что функции φ_1: $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ и $\varphi(\cdot,t)$: $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ являются DC-функциями по $x \ \forall (v,t)$: $v \in U, t \in T$. Кроме того, все функции являются гладкими по состоянию.

Введем следующие функционалы

$$\left.\begin{array}{l} (a): \ \ G\big(x(\cdot),u(\cdot)\big) := g_1\big(x(t_1)\big) + \int_T [g(x(t),t) + f(u(t),t)]dt\,, \\ (b): \ \ F\big(x(\cdot)\big) := h_1\big(x(t_1)\big) + \int_T h(x(t),t)dt\,; \end{array}\right\} \tag{5}$$

для которых все данные выпуклы и дифференцируемы по состоянию.

Поэтому для функционала $F\big(x(\cdot)\big)$ можно определить обобщенный дифференциал в виде

$$\langle\langle \nabla F\big(y(\cdot)\big), x(\cdot)\rangle\rangle := \langle \nabla h_1\big(y(t_1)\big), x(t_1)\rangle + \int_T \langle \nabla h(y(t),t), x(t)\rangle dt\,. \tag{6}$$

В силу выпуклости функций $h_1(\cdot)$, $h(\cdot,t)$ по фазе, справедливы известные неравенства

$$\left.\begin{array}{c} (a): \ \ \langle \nabla h_1(y), x - y\rangle \le h_1(x) - h_1(y) \ \ \forall x,y \in \mathbb{R}^n; \\ (b): \ \ \langle \nabla h(y(t),t), x(t) - y(t)\rangle \le h(x(t),t) - h(y(t),t) \\ \forall x(\cdot), y(\cdot) \in AC_n(T) \ \ \forall t \in T. \end{array}\right\} \tag{7}$$

А тогда верным будет и неравенство:

$$\langle\langle \nabla F\big(y(\cdot)\big), x(\cdot) - y(\cdot)\rangle\rangle \le F\big(x(\cdot)\big) - F\big(y(\cdot)\big) \ \ \forall x(\cdot), y(\cdot) \in AC_n(T). \tag{8}$$

для обобщенного градиента $\nabla F\big(y(\cdot)\big)$ функционала $F(\cdot)$, определенного формулой

$$\nabla F\big(y(\cdot)\big) := \big(\nabla h_1\big(y(t_1)\big), \nabla h(y(t),t), t \in T\big). \tag{6'}$$

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теоретические основы, методы и высокопроизводительные алгоритмы непрерывной и дискретной оптимизации для поддержки междисциплинарных научных исследований» (№ гос. регистрации: 121041300065-9).

Вместе с задачей $(\mathcal{P})$–(1)–(3) рассмотрим (частично) линеаризованную задачу оптимального управления вида:

$$\big(\mathcal{P}L(y)\big): \qquad \Phi_y(x(\cdot,u),u) \coloneqq G(x(\cdot,u),u) - \langle\langle \nabla F\big(y(\cdot)\big), x(\cdot)\rangle\rangle \downarrow \min_u, \;\; u(\cdot) \in \mathcal{U}, \tag{9}$$

вдоль системы управления (1)–(2).

Нетрудно увидеть, что линеаризцаия применена к функционалу $F\big(x(\cdot)\big)$, аккумулирующему все невыпуклости задачи $(\mathcal{P})$–(1)–(3), порожденные функционалом $J(u)$.

С другой стороны, задача оптимального управления $\big(\mathcal{P}L(y)\big)$ оказывается выпуклой в том смысле, что принцип Л.С. Понтрягина (PMP) оказывается для нее не только необходимым, но и достаточным условием оптимальности (УО). В то же время, для задачи $(\mathcal{P})$–(1)–(3) PMP – только необходимое УО, и в этой задаче может быть огромное число локальных и, тем более, стационарных (PMP) управлений. Поэтому ниже будет предложена схема последовательного решения задач типа $\big(\mathcal{P}L(y)\big)$.

Пусть даны стартовое управление $u^0(\cdot) \in \mathcal{U}$, текущая итерация $u^s(\cdot) \in \mathcal{U}$, $s = 0,1,2,\dots,$ и соответствующие им состояния $x^0(t) \coloneqq x(t,u^0)$, $x^s(t) \coloneqq x(t,u^s)$, $t \in T$.

Тогда следующая итерация $u^{s+1}(\cdot) \in \mathcal{U}$ производится как приближенное решение линеаризованной задачи

$$\Phi_s(u) \coloneqq G(x(\cdot,u),u) - \langle\langle \nabla F\big(x^s(\cdot)\big), x(\cdot)\rangle\rangle \triangleq \tag{10}$$

$$\triangleq g_1\big(x(t_1,u)\big) - \langle \nabla h_1\big(x^s(t_1)\big), x(t_1,u)\rangle +$$

$$(\mathcal{P}L_s): \qquad + \int_T [g(x(t),t) + f(u(t),t) - \langle \nabla h(x^s(t),t), x(t,u)\rangle]dt \downarrow \min_{u(\cdot)}, \;\; u(\cdot) \in \mathcal{U},$$

вдоль системы управления (1)–(2).

Таким образом, мы имеем $(\mathcal{V}(\mathcal{P}L_s) > -\infty)$

$$\Phi_s(u^{s+1}) \le \inf_{u(\cdot)}\{\Phi_s(u) \mid u(\cdot) \in \mathcal{U}\} + \delta_s \triangleq \mathcal{V}(\mathcal{P}L_s) + \delta_s, \tag{11}$$

где числовая последовательность $\{\delta_s\}$ такова, что

$$\delta_s > 0, \;\; s = 0,1,2,\dots, \;\; \sum_{s=0}^{\infty} \delta_s < \infty. \tag{12}$$

Нетрудно увидеть, что условие (11) порождает следующую цепочку

$$-\delta_s \le \mathcal{V}(\mathcal{P}L_s) + \delta_s \le \Phi_s(u^s) - \Phi_s(u^{s+1}) \triangleq$$

$$= g_1\big(x^s(t_1)\big) - g_1\big(x^{s+1}(t_1)\big) - \langle \nabla h_1\big(x^s(t_1)\big), x^s(t_1) - x^{s+1}(t_1)\rangle +$$

$$+ \int_T [g(x^s(t),t) - g(x^{s+1}(t),t) + f(u^s(t),t) - f(u^{s+1}(t),t) - \tag{11′}$$

$$-\langle \nabla h(x^s(t),t), x^s(t) - x^{s+1}(t)\rangle]dt,$$

откуда, в силу выпуклости $h_1(\cdot)$ и $h(\cdot,t)$ по состоянию $x(t)$ $\forall t \in T$, следует, что

$$-\delta_s \le \Phi_s(u^s) - \Phi_s(u^{s+1}) \le g_1\big(x^s(t_1)\big) - g_1\big(x^{s+1}(t_1)\big) + h_1\big(x^{s+1}(t_1)\big) -$$

$$-h_1\big(x^s(t_1)\big) + \int_T [g(x^s(t),t) - g(x^{s+1}(t),t) + f(u^s(t),t) - f(u^{s+1}(t),t) + \tag{13}$$

$$+h(x^{s+1}(t),t) - h(x^s(t),t)]dt = \varphi_1\big(x^s(t_1)\big) - \varphi_1\big(x^{s+1}(t_1)\big) +$$

$$\int_T [\varphi(x^s(t),t) - \varphi(x^{s+1}(t),t) + f(u^s(t),t) - f(u^{s+1}(t),t)]dt \triangleq J(u^s) - J(u^{s+1}).$$

В частности, из (13) вытекает, что

$$J(u^{s+1}) \le J(u^s) + \delta_s, s = 0,1,2, \ldots \quad (14)$$

Как известно, неравенство (14) означает, что числовая последовательность $\{J(u^s)\}$ оказывается, с учетом (12), почти монотонно невозрастающей. Поэтому в силу Леммы 2.3.2 из [1], получаем, что существует конечный предел J_* такой что

$$\lim_{s\to\infty} J(u^s) := J_* \ge \mathcal{V}(\mathcal{P}) > -\infty. \quad (15)$$

Более того, с помощью (13), видим, что

$$-\delta_s \le \Phi_s(u^s) - \Phi_s(u^{s+1}) \le J(u^s) - J(u^{s+1}). \quad (16)$$

Следовательно, с учетом (15) и (13), получаем

$$\lim_{s\to\infty} \Delta\Phi_s := \lim_{s\to\infty} [\Phi_s(u^s) - \Phi_s(u^{s+1})] = 0. \quad (17)$$

А тогда нетрудно увидеть, что (16) позволяет посмотреть на неравенство

$$\Phi_s(u^s) - \Phi_s(u^{s+1}) \le \tau_s, \qquad \tau_s > 0, \quad (18)$$

как на возможный обоснованный и удобный критерий останова процесса вычислений. Более того, неравенство (18) позволяет называть управление $u^s(\cdot) \in \mathcal{U}$ критическим по отношению к методу локального поиска (11)–(12).

Наконец, можно доказать, что если функции $h_1(\cdot)$ и $h(\cdot, t)$, $t \in T$, являются сильно выпуклыми (что можно просто исполнить в силу DC-декомпозиции (4) функций $\varphi_1(\cdot)$ и $\varphi(\cdot, t)$, $t \in T$), то мы получим сходимость по состоянию следующего вида: $\{x^s(t_1)\}$ фундаментальна в $\mathbb{R}^n$; $\{x^s(t), t \in T\}$ сходится в $L_2^n(T)$.

1. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. М.: МЦНМО, 2011.
2. Chernousko F.L., Ananievski I.M., Reshmin S.A. Control of Nonlinear Dynamical Systems: Methods and Applications. Berlin: Springer , 2008.
3. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления. М.: Наука, 1973.
4. Габасов Р.Ф., Кириллова Ф.М. Оптимизация линейных систем. Минск: Изд-во Белорусск. ун-та, 1973.
5. Vasiliev O.V. Optimization Methods. Atlanta: Word Federation Publishing Company, 1996.
6. Срочко В. А. Итерационные методы решения задач оптимального управления. М.: Физматлит, 2000.
7. Тятюшкин А.И. Многометодная технология оптимизации управляемых. Новосибирск: Наука, 2006.

КАЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ ДИНАМИКИ «ВЕЛОСИПЕДНОЙ» МОДЕЛИ БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ

А. Н. Стрельников[1], А. Ю. Горнов[2]
[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет
[2]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
strelnikov077@rambler.ru, gornov@icc.ru

Появление на дорогах России беспилотных автомобилей нельзя не приветствовать. Ясно, что в «конечной перспективе» будут созданы надежные алгоритмы и технологии управления, позволяющие как повысить безопасность дорожного движения, так и освободить значительную часть наших сограждан от рутинного и тяжелого труда. Однако к настоящему времени успехи организаций, продвигающих практики беспилотного транспорта, несмотря на весьма значительное вложенные средства, далеки от совершенства. Множество сообщений о серьезных зарубежных авариях, в том числе в ряде случаев, со смертельным исходом, заставляет серьезно задуматься перед тем, как садиться, например, в такси без живого водителя. Поиск причин и препятствий, возникающих на пути автоматического транспорта, продолжает оставаться одной из самых актуальных задач современной теории управления.

Среди множества моделей, используемых для поиска рациональных технологий автоматического управления транспортными средствами, чаще всего в публикациях упоминаются модели Дубинса, Ридса–Шеппа и так называемая исторически «велосипедная» модель (см., напр., [1, 2]). Две первые модели можно рассматривать как относительно простые системы, вложенные в велосипедную модель как ее часть. Для модели Дубинса в течение многих лет ведутся детальные исследования количественных аспектов ее функционирования с применением современных методик фазового оценивания (см., напр., [3–5]). Однако для более общей (и сложной!) «велосипедной» модели такие работы, по нашим сведениям, пока не выполнялись.

В докладе производится качественная оценка степени нелокальности модели, и, очевидно, сложности приближенно отражаемой ею управляемой динамики автомобиля. В качестве инструмента исследования использованы технологии аппроксимации множества достижимости, развиваемые нами в течение ряда лет (см., напр., [6, 7]).

Динамика системы задается уравнениями $\dot{x} = v \cdot \cos\theta$, $\dot{y} = v \cdot \sin\theta$, $\dot{\theta} = v/b \cdot \tan\gamma$, $\dot{v} = a$, $\dot{\gamma} = k_1(\gamma_{des}(t) - \gamma)$, $\dot{a} = k_2(a_{des}(t) - a)$. Ограничения на управления:

$$-0.5 \le \gamma_{des} \le 0.5, \; -2.8 \le a_{des}(t) \le 2.8$$

Начальный вектор будем выбирать следующим – (7.0, –220.0, –1.5, 0.8, –0.025, 0.0); значения коэффициентов модели заданы: $b = 2.0$, $k_1 = 4.2$, $k_2 = 5.1$.

Построен набор проекций множества достижимости со временами от 1 до 3.5 с шагом 0.5. Динамика множества достижимости системы в плоскости (x,y) подробно описана нами в работе [8]. В этой плоскости фазовые портреты не показали каких-либо серьезных конфликтных проблем, имеющих место в исследуемой системе. На рисунках 1 и 2 приведена динамика системы в плоскостях (x,v), (y,v), на рисунке 3 в плоскости (x, θ).

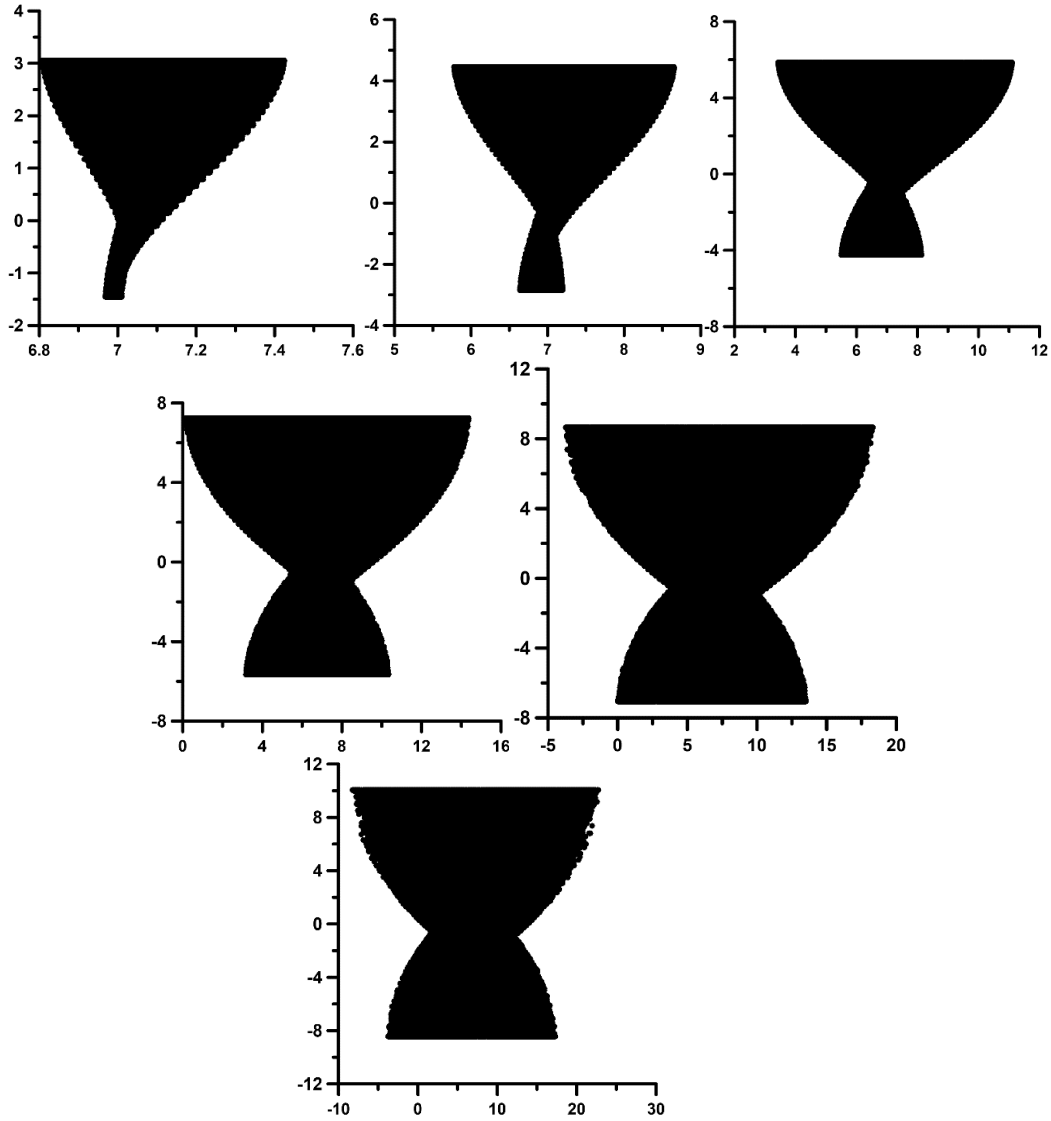
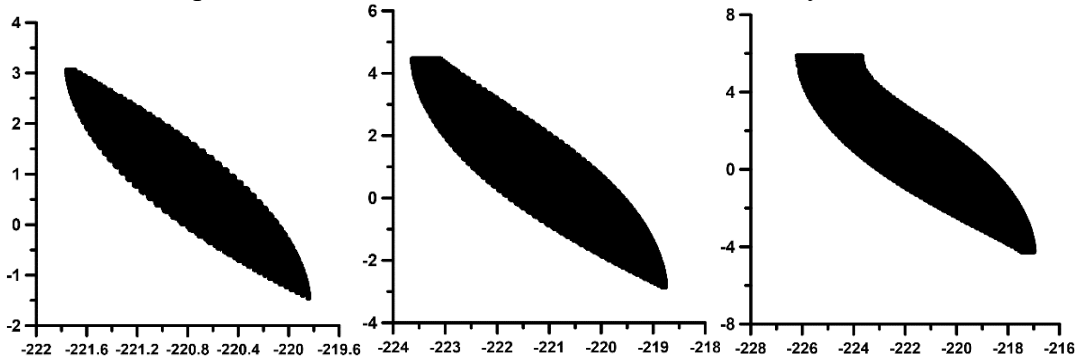


Рисунок 1. Динамика множества достижимости в плоскости (x,v).

Динамика множества достижимости на рисунках 1 и 2 хорошо отражает рост возможностей автомобиля с увеличением времени, выдаваемого на маневр. При недостатке времени некоторые в окрестности текущего состояния недоступны, но затем заполненность растет, и, в конечном итоге, «области недоступности» исчезают.



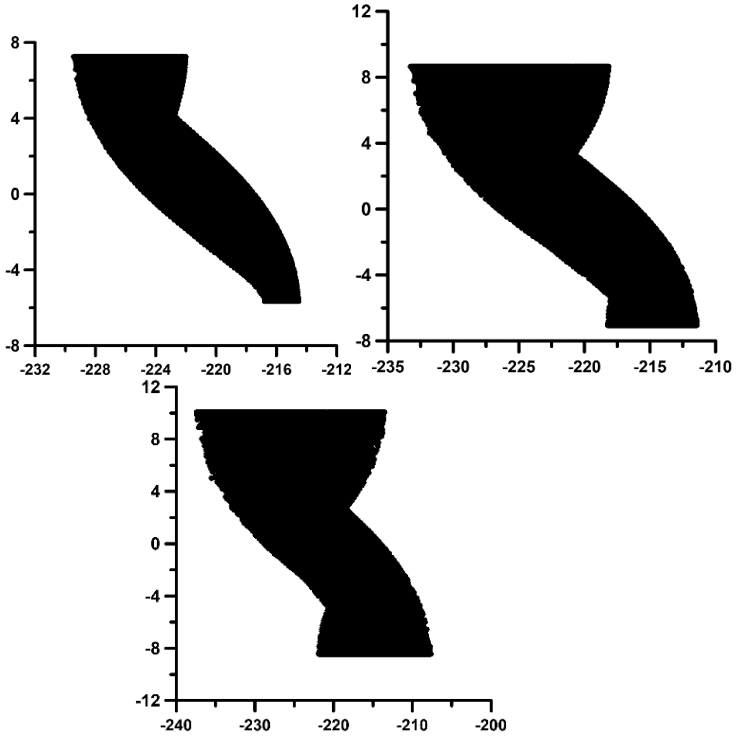
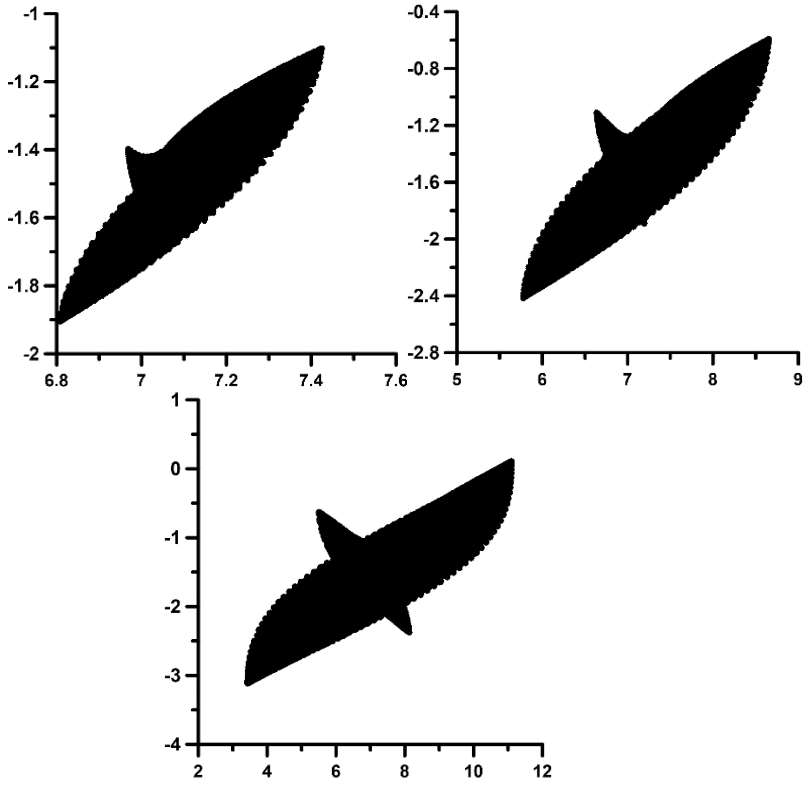


Рисунок 2. Динамика множества достижимости в плоскости (y,v).



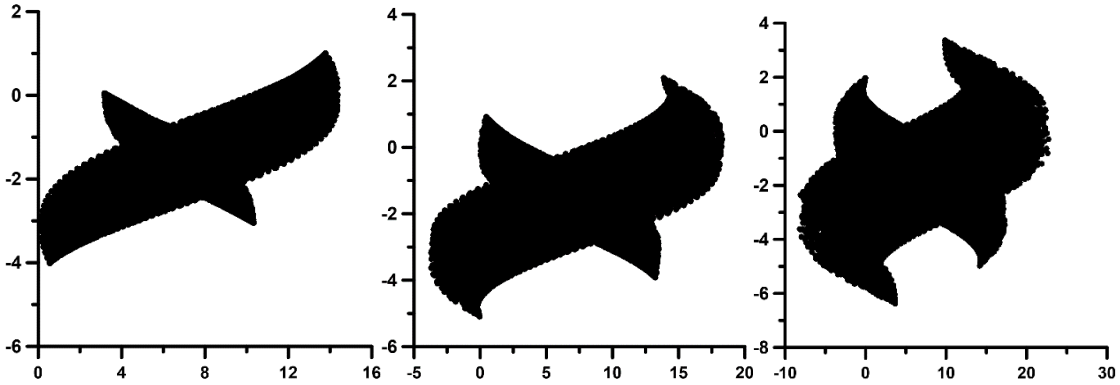


Рисунок 3. Динамика множества достижимости в плоскости (x, θ).

Проблемы динамики системы видны только в плоскости (x, θ). Но проблемы эти никак нельзя назвать малосущественными. При небольшой длине маневра имеется лишь небольшой паразитический «отросток» множества достижимости; с ростом времени маневра появляется второй отросток; затем эти «щупальца» вырастают и вполне могут выступать в качестве «улова» для траектории, способной зафиксировать динамику объекта в совершенно непригодном для выполняемого маневра состоянии.

Вывод качественного исследования: в системе возможны (и показаны) аварийные ситуации, при которых происходит нелокальная потеря управляемости, и требуемое движение автомобиля не может быть достигнуто ни при каких управлениях.

1. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов // Спб., Наука, 2001.
2. Meijaard J.P., Schwab A.L. Linearized equations for an extended bicycle model // Proc. of III European Conf. on Comp. Mechanics Problems in Engineering. Lisbon, 2006. 18 p.
3. Стрельников А.Н., Горнов А.Ю. Сравнительное исследование возможностей автомобильных моделей Дубинса и Ридса-Шеппа // Ляпуновские чтения. 2023. С.105.
4. Смирнов И.А. Математическое моделирование заноса автомобиля. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук // Москва, МГУ, 2011.
5. Пацко В.С., Федотов А.А. Трехмерное множество достижимости для машины Дубинса: сведение общего случая ограничений на повороты к каноническому // Известия РАН. Теория и системы управления, 2023. № 4. С. 25–49.
6. Стрельников А.Н., Горнов А.Ю. Численное исследование предельных возможностей «велосипедной» модели автомобиля // Ляпуновские чтения. 2024. С. 199–200.
7. Финкельштейн Е.А., Горнов А.Ю. Алгоритм квазиравномерного заполнения множества достижимости нелинейной управляемой системы // Известия ИГУ. Математика. 2017. Т. 19. С. 217–223.
8. Sorokovikov P., Gornov A., Strelnikov A. Algorithm for the Numerical Solution of Optimal Control Problems in Robotic Systems // Lecture Notes in Computer Science: 12th International Conference Optimization and Applications (OPTIMA 2021). Vol. 13078. P. 203 –214.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКОВ ПОРАЖЕНИЯ РЕСПИРАТОРНОГО ТРАКТА ПРИ ГАСТРОЭЗОФАГЕАЛЬНОЙ РЕФЛЮКСНОЙ БОЛЕЗНИ

И. В. Темникова[1], Е. В. Онучина[2], Т. С. Зароднюк[3], А. Ю. Горнов[3]
[1]ЧУЗ «Клиническая больница «РЖД – Медицина»
[2]ИГМАПО – филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России
[3]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

В докладе обсуждаются проблемы оценки рисков поражения, развития хронических заболеваний верхних отделов респираторного тракта, утраты качества жизни пациентов с гастроэзофагеальной рефлюксной болезнью (см., напр., ([1–3]). Гастроэзофагеальная рефлюксная болезнь (ГЭРБ) доминирует среди заболеваний органов пищеварения. Актуальность проблемы выражается в высокой распространенности ГЭРБ в мире. Распространенность ГЭРБ в странах Западной Европы и Северной Америки уже достигает 25,9–27,8 %, Восточной Азии – 7,8 %; обнаружен ее рост в Западной Европе и Северной Америке на 4 % в год; в Азии за десятилетний период частота эрозивной формы рефлюксной болезни увеличилась в несколько раз. Поражение респираторного тракта составляет 85–90% среди всех внепищеводных проявлениях ГЭРБ ([1]).

Обучающая выборка для моделирования составлена из 132 последовательных стационарных пациентов гастроэнтерологического и оториноларингологического отделений Дорожной клинической больницы РЖД, подписавших информированное согласие на исследование. Для каждого пациента имеются данные по основным 60 клиническим и лабораторным показателям. В докладе для поиска ответов на вопросы, формулируемые практикующими врачами, предложена методика моделирования дискриминантного типа; подобные подходы являются традиционными для работ в данной научной области (см., напр., [3]). Методика ориентирована на решение задачи классификации с особым видом представления результата – на основе сравнения выходов двух формул (микромоделей), количественное соотношение которых и кодирует ответ, является ли конкретный пациент больным или здоровым. После обучения моделей получен следующий их вид

$$F_1 = 0.1002 + 0.1491x_1 + 0.4422x_2 + 0.1045x_3 + 0.1894x_4,\ F_2 = 0.2002 + 0.1491x_1 + 0.3255x_2 + 0.2237x_3 + 0.1014x_4,$$

здесь x_1 – индекс массы тела по Кетле; x_2 – pH верхнего отдела респираторного тракта; x_3 – наличие гастроэзофагеальной рефлюксной болезни: нет – 0, есть – 1; x_4 – наличие билиарной патологии (желчно-каменной болезни или постхолецистэктомического синдрома): нет – 0, есть – 1. Если $F_1 > F_2$, то методика прогнозирует высокий риск; если $F_1 < F_2$ – риск низкий. Погрешность распознавания на прецедентах нашей базы составила 3.2%. Расчеты выполнялись с применением программного комплекса OPTCON (вариант 2024 года).

1. Onuchina E., Subbotina M., Temnikova I., Vasyutin A.V., Tsukanov V.V. The microflora spectrum of the nasal cavity associated with GERD in patients with chronic rhinosinusitis // Gastroenterology. 2016. Vol. 150, N.4(1). P. 266−267.
2. Темникова И.В., Субботина М.В., Онучина Е. В. Клинико-лабораторные особенности хронического риносинусита, ассоциированного с гастроэзофагеальной рефлюксной болезнью // Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. 2015. Т. 25, № 5. С.13.
3. Темникова И.В., Субботина М.В., Онучина Е. В. Качество жизни пациентов с хроническим риносинуситом, ассоциированным с гастроэзофагеальной рефлюксной болезнью // Сибирский медицинский журнал. Иркутск, 2015. № 8. С. 33–36.

АВТОМАТИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА НА БАЗЕ СПЕКТРОМЕТРА OPTOSKY ПОД LINUX

Е. М. Тимофеев
Иркутский государственный университет
geka.timof@mail.ru

В рамках проекта представлен завершённый программно-аппаратный комплекс для автоматизированного сбора и анализа спектральных данных с использованием спектрометра Optosky ATP6500 на платформе Linux. Разработанное решение интегрирует спектрометр, флуоресцентный микроскоп и серводвигатель в единую систему с графическим интерфейсом для пользователя. Реализованы модули захвата спектральных данных в режиме реального времени и управления фокусировкой микроскопа. Решены критические проблемы интеграции с консольным API спектрометра, включая организацию интерактивного ввода команд и настройку безопасного запуска приложения с привилегиями sudo без необходимости постоянного ввода пароля.

Актуальность работы обусловлена тем, что в Научно-исследовательском институте биологии Иркутского государственного университета реализуется проект по мониторингу биохимических показателей эндемичных рачков-амфипод озера Байкал с использованием флуоресцентных имплантов. Для анализа спектральных характеристик была создана установка на основе микроскопа Z16 Apo (Leica) и спектрометра ATP6500 (Optosky) [4]. Однако базовое программное обеспечение спектрометра имело критические ограничения: документация доступна только на китайском языке, графический интерфейс под Windows предоставляет лишь базовые функции, а для Linux поддерживается только консольный API с ручным вводом команд [4] [5]. Это делало невозможной полноценную автоматизацию процесса сбора и анализа данных. Задачей работы стала разработка полнофункционального программного комплекса под Linux, обеспечивающего автоматическую интеграцию всех компонентов установки с удобным графическим интерфейсом и гибкими возможностями настройки.

Разработанный комплекс реализован на языке Python с использованием библиотек PyQt5 для графического интерфейса [2], pyqtgraph для визуализации спектров в реальном времени [3] и numpy для обработки данных [6]. Архитектура приложения построена по многопоточной модели: основной поток отвечает за графический интерфейс, отдельный поток управляет подключением к спектрометру и сбором данных с использованием мьютексов для синхронизации доступа. Такая архитектура обеспечивает отзывчивость интерфейса даже при интенсивной работе со спектрометром. Система предоставляет автоматический захват и анализ спектральных данных в режиме реального времени, управление серводвигателем для точной фокусировки микроскопа, что позволяет снимать серии спектральных данных при фокусировке на различные глубины в тканях организма. Приложение поддерживает две темы оформления — светлую и тёмную, которые можно переключать в процессе работы без перезапуска программы. Также реализована полная поддержка русского и английского языков с возможностью переключения через графический интерфейс, что делает систему доступной для международных исследовательских групп. Все параметры интерфейса, включая пути сохранения файлов, тему по умолчанию и язык, настраиваются через конфигурационный файл без необходимости изменения основного кода программы.

Ключевой технической проблемой стала интеграция консольного API спектрометра. Первоначальная попытка использования os.popen() привела к бесконечному циклу из-за особенностей работы скрипта в интерактивном режиме. Замена на subprocess.Popen() не решила проблему: скрипт требовал интерактивного ввода команд, что приводило к зависанию при ожидании ввода и задержкам передачи данных из-за буферизации. Для решения этой проблемы была применена библиотека pexpect [1], специально предназначенная для автоматизации интерактивного взаимодействия с консольными программами. Это позволило устранить бесконечный цикл и обеспечить корректное взаимодействие с API спектрометра.

Однако после успешного подключения возникла новая проблема: скрипт не обнаруживал подключённый прибор. Анализ системы API спектрометра показал, что скрипт требует выполнения с привилегиями sudo для работы [7]. Для решения этой проблемы была разработана система безопасного запуска приложения через bash-скрипт и настройку sudoers. Через команду visudo в файл sudoers добавляется правило вида: "имя_пользователя ALL=(ALL) NOPASSWD: путь_к_python3 путь_к/main.py", что позволяет запускать конкретный скрипт с правами sudo без запроса пароля [7]. Для обеспечения безопасности директория Spectrometer защищена от редактирования, что предотвращает несанкционированное изменение исполняемых файлов. При этом файлы конфигурации остаются доступными для редактирования пользователем без прав sudo, что обеспечивает гибкость настройки приложения. Такое решение позволило автоматизировать запуск приложения через ярлык рабочего стола без необходимости постоянного ввода пароля, сохраняя при этом безопасность системы.

Для управления серводвигателем был разработан модуль, обеспечивающий точную настройку высоты и фокуса микроскопа. Графический интерфейс предоставляет широкий набор инструментов для работы со спектральными данными. Реализована функция записи и вычитания тёмнового спектра для повышения точности измерений, настройка времени интеграции спектрометра в реальном времени, автоматическое обнаружение и предупреждение о переосвещении матрицы. Система позволяет загружать ранее сохранённые спектры и отображать их на графике одновременно с текущими измерениями для сравнительного анализа, причём каждый загруженный спектр автоматически окрашивается в уникальный цвет для явного выявления различий [3]. Реализована возможность удаления выбранных спектров из графика через интерактивный список. Для удобства работы добавлено отображение координат курсора мыши на графике в реальном времени, автоматический сброс масштаба графика с учётом всех отображённых спектров по горячей клавише, а также быстрое сохранение данных по сочетанию клавиш. Предусмотрен режим работы без подключённого спектрометра для отладки и демонстрации возможностей системы. Реализована система отладки через вывод подробных логов в консоль при запуске приложения через терминал. Дополнительно интегрирована возможность запуска внешних процессов для дальнейшей обработки полученных спектральных данных непосредственно из интерфейса приложения.

В результате работы создан полнофункциональный программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий автоматизированный сбор и анализ спектральных данных для биологических исследований. В отличие от заводского API, требующего ручного ввода команд, созданная система позволяет получать и обрабатывать спектры в режиме реального времени, представляя результаты в удобном графическом интерфейсе [2]. Решены критические проблемы интеграции консольного API спектрометра и организации безопасного управления привилегиями в Linux. Разработанное решение успешно внедрено в НИИ биологии ИГУ и используется для

мониторинга биохимических показателей эндемичных организмов озера Байкал. Комплекс имеет потенциал для расширения на другие модели спектрометров и научные задачи, что делает его универсальным инструментом для автоматизированного спектрального анализа в биологии и смежных областях.

1. Официальная документация по библиотеке pexpect для Python [pexpect.readthedocs.io] https://pexpect.readthedocs.io/en/stable/ (дата обращения: 10.02.2025)
2. Официальная документация по библиотеке PyQt5 для Python [www.riverbankcomputing.com] https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5 (дата обращения: 15.02.2025)
3. Официальная документация по библиотеке pyqtgraph для Python [pyqtgraph.readthedocs.io] https://pyqtgraph.readthedocs.io/en/latest (дата обращения: 17.02.2025)
4. Техническая документация спектрометра ATP6500 [optosky.com] https://optosky.com/atp6500.html (дата обращения: 12.02.2025)
5. Azimp.ru Спектрометр ATP6500, характеристики и применение [azimp.ru] https://azimp.ru/catalogue/optosky_spectrometers/52694/ (дата обращения: 14.02.2025)
6. Официальная документация по библиотеке NumPy для Python [numpy.org] https://numpy.org/doc/ (дата обращения: 08.03.2025)
7. Документация Linux по управлению правами sudo [sudo.ws] https://www.sudo.ws/docs/ (дата обращения: 18.02.2025)
8. Github проекта [github.com] https://github.com/GekaTimof/Microscope_project

КОНЦЕПЦИЯ ПОДХОДА СЕМАНТИЧЕСКОГО АННОТИРОВАНИЯ СТОЛБЦОВ ТАБЛИЦ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ*

К. В. Тобола
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
kirilltobola@icc.ru

Таблицы являются одним из самых распространенных форматов данных, они содержаться в базах данных, финансовых отчетах, научных публикациях, веб-страницах и других документах. Таблицы хранят структурированные данные, а также факты и связи, что делает их богатым источником данных для целого спектра различных задач, от аналитики данных до дополнения графов знаний и обучения больших языковых моделей. Создание моделей, умеющих автоматически понимать табличные данные – это еще один шаг к созданию универсальных ассистентов, позволяющих проводить интеллектуальный анализ данных на естественном языке. В рамках данной работы рассмотрены современные методы автоматического понимания табличной информации, в частности одна из ключевых задач – семантическое аннотирование столбцов таблиц концептами из целевого графа знаний.

На данный момент для решения этой задачи в основном используются предварительно обученные языковые модели (Pre-trained Language Models – PLM), такие как: TURL [1], TaBERT [2], и Doduo [3]. Они достигают наилучших оценок производительности (более 90% по метрике F1) на различных тестовых наборах данных, таких как WebTables [4], WikiTables [5], GitTables [6]. Тем не менее, эти методы не лишены недостатков, в первую очередь связанных с переносимостью модели на реальные практические данные. Такие модели обучены распознавать набор семантических типов (классов) и их свойств (отношений), которые используются в процессе обучения. Такие наборы, как правило, не превышают несколько сотен экземпляров. Для того, чтобы перенести данную модель на новую область знаний, ее необходимо обучить на размеченном наборе данных, создание которого является трудозатратным процессом. Помимо этого, процесс обучения требует дополнительных вычислительных ресурсов. Эти недостатки делают решения, основанные на PLM, трудными для использования в реальных практических задачах.

Наиболее перспективными подходами с точки зрения универсальности и простоты переносимости на другую область знаний являются решения [7-9], использующие большие языковые модели (Large Language Models – LLM). Размер обрабатываемого контекста у таких моделей на порядок больше чем у PLM, что позволяет им обрабатывать большие таблицы. А также эти модели способны легко адаптироваться под различные области знаний, такие как медицина, финансы, логистика и другие. Также преимуществом LLM является способность к пошаговым рассуждениям, что может быть полезным при решении задач понимания табличных данных. Однако данные модели не способны понимать двумерную структуру таблиц, что сказывается на их производительности. Для обработки таблиц, как и в PLM, необходимо использовать специальные векторные представления позиций строк и столбцов. Помимо прочего, в сравнении с PLM, большие языковые модели требуют

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9).

еще больших ресурсов для настройки под конкретную задачу понимания табличных данных.

С учетом рассмотренных преимуществ и недостатков существующих методов был предложен подход, вдохновленный идеей, используемой в мультимодальных LLM. Данный подход основан на модульной архитектуре, при которой векторные представления специализированного табличного кодировщика рассматриваются как новая модальность для LLM. В качестве табличного кодировщика могут выступать специализированные PLM, а также другие методы, способные эффективно кодировать таблицы. Проекция векторных представлений табличного кодировщика в пространство LLM позволяет интегрировать табличную информацию в запросы к LLM на естественном языке в качестве дополнительного контекста. Это значительно повышает эффективность решения задач, связанных с пониманием табличных данных, и создает основу для автоматического извлечения и обогащения баз знаний на основе таблиц.

1. Deng X. et. al. Turl: Table understanding through representation learning. ACM SIGMOD Record. 2022. P. 33–40.
2. Yin P., Neubig G., Yih W., Riedel S. TaBERT: Pretraining for Joint Understanding of Textual and Tabular Data. Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2020. P. 8413–8426.
3. Suhara Y. et. al. Annotating columns with pre-trained language models. Proceedings of the 2022 International Conference on Management of Data. 2022. P. 1493–1503.
4. Cafarella M. et. al. Webtables: exploring the power of tables on the web. Proceedings of the VLDB Endowment. 2008. P. 538–549.
5. Bhagavatula C., Noraset T., Downey D. Methods for exploring and mining tables on wikipedia. Proceedings of the ACM SIGKDD workshop on interactive data exploration and analytics. 2013. P. 18–26.
6. Hulsebos M., Demiralp Ç., Groth P. Gittables: A large-scale corpus of relational tables. Proceedings of the ACM on Management of Data. 2023. P. 1–17.
7. Li P. et. al. Table-gpt: Table fine-tuned gpt for diverse table tasks. Proceedings of the ACM on Management of Data. 2024. P. 1–28.
8. Wei L., Xiao G., Balazinska M. RACOON: an llm-based framework for retrieval-augmented column type annotation with a knowledge graph. // arXiv preprint. 2024. arXiv:2409.14556.
9. Zhang T. et. al. Tablellama: Towards open large generalist models for tables // arXiv preprint. 2023. arXiv:2311.09206.

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМАЦИЯМИ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

А. А. Толстихин
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
madstayler93@gmail.com

Организация движения скоординированной группы роботов в среде с препятствиями является классической задачей управления робототехническими комплексами. Однако, не смотря на обилие существующих подходов к ее решению [1], в настоящий момент существует огромное количество практических постановок задачи и ограничений, накладываемых при ее решении. Все это не позволяет создать универсальную стратегию управления.

В данной работе рассматривается подход, основанный на методе поведенческой структуры [2] и объединяющий как механизмы избегания столкновения с препятствиями, так и организации заданной формации. При этом, предполагается, что роботы параллельно решают некую другую практическую задачу, описывающую их характер перемещения в среде. Основным достоинством выбранного подхода является то, что метод поведенческой структуры позволяет оформить решение каждой отдельной подзадачи в виде некоторой силы. Соответственно, движение каждого робота задается линейной комбинацией таких сил. Управляя коэффициентами усиления, можно в режиме реального времени менять приоритеты в поведении роботов, а также переключаться между разными формациями, чтобы лучше удовлетворять текущим условиям окружения.

Так, например, формация «шеренга» задается следующей силой:

$$F_i^l = a_1\, n_i \tan\left(\theta_i - \theta_{offset}\right) - a_2 \sum_{j \in N_i} \left(\nabla_{q_i} U_{ij}^c\left(\|q_{ij}\|\right)\right),$$

$$U_{ij}^c\left(\|q_{ij}\|\right) = \alpha\left(\frac{1}{2}\left(\|q_{ij}\| - d_{ij}^A\right)^2 + \beta \ln\|q_{ij}\| + \beta \frac{d_{ij}^A}{\|q_{ij}\|}\right),$$

где $q_{ij} = q_i - q_j$; q_i – вектор состояния текущего агента; q_j – вектор состояния агента-соседа из множества N_i, которое динамически определяется с помощью предложенного механизма отбора соседей; ∇_{q_i} – градиент относительно вектора q_i; $d_{ij}^A > 0$ – определяет желаемое расстояние между агентами; θ_i – угол между главной нормалью n_i к вектору, исходящему от робота к центру масс группы, и вектором, определяющим желаемое направление движения; θ_{offset} – параметр, отвечающий за угол ориентации шеренги к желаемому вектору движения; $a_1, a_2, \alpha, \beta \in \mathbb{R}^+$ – управляющие параметры.

Особое внимание в работе уделяется прохождению группой препятствий коридорного типа, которые являются потенциальной ловушкой (локальным экстремумом равнодействующей управляющих сил), но могут быть преодолены с помощью смены формации группы.

1. Oh D., Lim Y., Jung H. et al. A Survey on Collision Avoidance Algorithms for Multi-robot Systems // Int. J. Control Autom. Syst. 2025. №23. P. 2019–2035.
2. Bautista J. Behavioral-based circular formation control for robot swarms // 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Yokohama, Japan, 2024. P. 8989–8995.

СЕГМЕНТАЦИЯ РЕГИОНОВ ДОКУМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ*

Р. И. Трифонов, Д. Е. Копылов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
Иркутский государственный университет
tr1fonov.roman@yandex.ru, it-daniil@yandex.ru

В работе рассматривается восстановление структурной разметки документов при помощи графовых нейронных сетей (GNN) [1, 2] в рамках этапа задачи анализа макета документа (DLA) [3]. Восстановление проводится для двух типов исходных данных. К первому типу относятся PDF документы, содержащие текстовый слой, информацию из которого можно извлечь с помощью PDF-парсеров. Ко второму типу относятся PDF без текстового слоя, например сканы и фотографии, для таких документов требуется предварительная обработка с использованием технологии OCR. При этом стандартные методы извлечения текстовых элементов для обоих типов не дают полных сведений о структуре документа, в частности о границах регионов (абзацев, заголовков и т.п.).

Практическая проблема, выявленная в работе, связана с ошибками выделения строк при обработке изображений документов. OCR-системы часто некорректно разделяют соседние столбцы и объединяют фрагменты текста из разных колонок в единый поток текста. В результате появляются слияния строк, пропуски переносов и неточные границы строк. Такие ошибки искажают геометрические и текстовые характеристики, которые используют модели восстановления структуры документа, и в результате снижают качество сегментации.

Предлагаемое в рамках данной работы решение изучает подходы на двух уровнях представления графа: узлы, соответствующие строкам, и узлы, соответствующие словам.

Для строковой модели в узловые признаки включены координаты строки, индикатор заглавной буквы, доля цифровых символов, признаки пунктуации и индикаторы маркированных и нумерованных списков. Длина вектора признаков составляет 15 значений. Признаки ребер графа на уровне строк содержат четыре величины, а именно угол и расстояние от центра, и угол с расстоянием между ближайшими точками блоков.

Для модели на уровне слов узловой вектор расширен за счет стилевых признаков шрифта, извлекаемых сверточной сетью, текстовых признаков, получаемых с использованием токенизатора BERT, координат и индикаторов пунктуации, ключевых слов и маркеров списков. Размер вектора в сумме равен 47 значений. Ребра на уровне слов описываются углом и евклидовым расстоянием, размер вектора ребра равен 2.

Процесс обучения производился с использованием набора данных PubLayNet [4] и был организован следующим образом. Строковая модель обучалась 40 эпох с размером порции данных 50 документов и шагом обучения 0.01. Модель на уровне слов обучалась 30 эпох с размером порции данных 80 документов и шагом обучения 0.005.

В качестве критериев качества выступали следующие метрики: F1@WordIoU[0.5, 0.95] (F1@RowIoU[0.5, 0.95]) и mAP@IoU[0.5:0.95]. Последняя

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9).

метрика является классической, все научные работы, посвященные сегментации, используют эту метрику. F1 – мера также является классической метрикой, но для ее расчета требуется список правильно и неправильно детектированных регионов, в отличие от mAP (Mean Average Precision), которая работает со степенью уверенности, что регион определен правильно. В основе метрик лежит оценка IoU (Intersection over Union), определяемое как отношение площади пересечения детектированного и эталонного регионов к площади их объединения. WordIoU – это показатель, который вычисляется для слов как отношение числа правильно детектированных слов в пересечении к сумме слов в детектированном сегменте и в эталонном регионе. RowIoU аналогично WordIoU, только вычисляется по строкам. Результаты работы моделей представлены в «табл. 1».

Таблица 1 – Точность для разных нейросетевых моделей

	F1@WordIoU[0.5]	F1@WordIoU[0.95]	mAP@IoU[0.5:0.95]
Изображения (строки)	0.4596	0.1789	0.0082
Изображения (слова)	0.4878	0.3259	0.1230
PDF (строки)	0.8821	0.7117	0.2455

Эксперименты показывают явную зависимость эффективности подхода от качества исходной сегментации строк. Для PDF документов строковая GGN продемонстрировала наилучшие результаты, что объясняется корректной разметкой в исходном PDF. На изображениях и сканах строковая модель теряет точность из-за ошибок OCR при выделении строк. Модель на уровне слов улучшает результаты на изображениях относительно строковой версии, но ее показатели остаются ниже значений, строкового подхода для PDF с текстовым слоем.

Решить проблему неверной детекции строк в PDF без текстового слоя можно за счет использования GGN на уровне слов для формирования строк, что потенциально может позволить формировать строки такого же уровня качества как в PDF. Помимо этого, направление дальнейших исследований охватывают использование новых наборов данных, эксперименты по подбору признаков, выявление и корректировку ошибок при построении графа.

1. Zhou J., Cui G., Hu S., Zhang Z., Yang C., Liu Z., Wang L., Li C., Sun M. Graph neural networks: A review of methods and applications // AI Open, 2020. Vol. 29. P. 57-81. DOI: 10.1016/j.aiopen.2021.01.001.
2. Wu Z., Pan S., Chen F., Long G., Zhang C., Yu P. A Comprehensive Survey on Graph Neural Networks // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021. Vol. 32. P. 4-24. DOI: 10.1109/tnnls.2020.2978386.
3. Binakhashen G. M., Mahmoud S. A. Document Layout Analysis: A Comprehensive Survey // ACM Computing Surveys, 2020. Vol. 52. P. 1-36. DOI: 10.1145/3355610.
4. Zhong X., Tang J., Yepes A. PubLayNet: largest dataset ever for document layout analysis // ICDAR, 2019. P. 1015-1022. DOI: 10.1109/ICDAR.2019.00166.

МНОГОМЕТОДНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ФУНКЦИЙ И ПАРАМЕТРОВ*

А. И. Тятюшкин
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
tjat@icc.ru

Пусть задан управляемый процесс с управляющими параметрами как в правых частях, так и в начальных условиях

$$\dot{x} = f(x,u,w,t), x(t) \in E^n, u(t) \in E^r, t \in T = [t_0,t_1],$$
$$x(t_0) = \Theta(v), w \in R^p, v \in R^n \qquad (1)$$

с терминальными условиями

$$I_i(u) = h_i\big(x(t_1)\big) = 0, i = \overline{1,m}, \qquad (2)$$

и фазовыми ограничениями

$$J_i(u,v) = g_i(x(t),t) = 0, t \in T, i = \overline{1,s}. \qquad (3)$$

Управление и параметры стеснены следующими ограничениями:

$$c_i(u,t) = 0, t \in T, i = \overline{1,l}, \qquad (4)$$

$$u^{\text{н}}(t) \le u(t) \le u^{\text{в}}(t), t \in T, \qquad (5)$$

$$v^{\text{н}} \le v \le v^{\text{в}}, w^{\text{н}} \le w \le w^{\text{в}}, \qquad (6)$$

где $c_i(u,t)$, $i = \overline{1,l}$, — непрерывно дифференцируемые по u и кусочно-непрерывные по t функции; $\Theta(v)$ — непрерывно дифференцируемая вектор-функция

Требуется среди управлений и параметров, удовлетворяющих ограничениям (4)–(6), найти такие, которые обеспечивают выполнение условий (3) для управляемого процесса (1) и приводят его в точку фазового пространства, где с заданной точностью будут выполнены условия (2), а функционал

$$I_0(u) = \phi\big(x(t_1)\big) \qquad (7)$$

достигнет наименьшего значения.

Градиенты функционалов $I_j(u)$, $j = \overline{0,m}$, с помощью функций $H^j\big(\psi_j,x,u,t\big) = \psi_j'(t)f(x,u,t)$ и сопряженной системы

$$\dot{\psi}_j = -f_x(x,u,t)'\psi_j(t), \psi_j(t_1) = -\phi_x^j\big(x(t_1)\big)$$

традиционно определяются по формулам: $\nabla I_j(u) = -H_u^j\big(\psi_j,x,u,t\big), j = \overline{0,m}$.

Для каждого $t \in T$ можно аналогично вычислить градиенты $J_j(u,t), j = \overline{1,s}$:

$$\nabla I_j(u,t) = -\bar{H}_u^j\big(\Phi_j,x,u,t,\tau\big), t_0 \le \tau \le t \le t_1,$$

где $\bar{H}^j\big(\Phi_j,x,u,t,\tau\big) = \Phi_j'(t,\tau)f(x,u,\tau)$, $\Phi_j(t,\tau)$, $j = \overline{1,s}$ – решения сопряженной системы

$$\frac{\partial \Phi_j(t,\tau)}{\partial \tau} = -\frac{\partial f(x,u,\tau)}{\partial x}\Phi_j(t,\tau), \tau \in [t_0,t]$$

с краевыми условиями

$$\Phi_j(t,t) = -\frac{\partial g^j(x(t))}{\partial x}, j = \overline{1,s}.$$

Матрица-якобиан линеаризованных составляется из градиентов ∇I_i, $i = \overline{1,m}$, и $\nabla J_j(t)$, $j = \overline{1,s}$, $t \in T$. Так как правые части и начальные условия системы (1) зависят

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№° гос. регистрации: 121041300060-4).

еще и от параметров, то необходимо иметь также градиенты функционалов I_i, $i = \overline{1,m}$, и $J_j(t)$, $j = \overline{1,s}$, $t \in T$, по этим параметрам:

$$\nabla_v I_i(u^k, w^k, v^k) = -\psi_i(t_0)'\Theta_v(v^k), i = \overline{1,m},$$
$$\nabla_w I_i(u^k, w^k, v^k) = -\int_{t_0}^{t_1} \psi_i(t)' f_w(x^k, u^k, w^k, t)dt, \quad (8)$$

где $\psi_i(t)$ — решения системы,

$$\nabla_w J_i\left(u^k, w^k, v^k, t^j\right) = -\int_{t_0}^{t^j} \Phi_i(t)' f_w(x^k, u^k, w^k, t)dt, \quad (9)$$
$$\nabla_v J_i\left(u^k, w^k, v^k, t^j\right) = -\Phi_i(t_0)'\Theta(v^k), i = \overline{1,s}, j = \overline{1,N}. \quad (10)$$

Из полученных значений градиентов по управлению∇I_i, $i = \overline{1,m}$, и $\nabla J_j(t)$, $j = \overline{1,s}$, $t \in T$, и вычисленных по формулам (8)–(10) градиентов по параметрам составляется матрица коэффициентов линеаризованных ограничений.

На каждой итерации метода спроектированного лагранжиана [1], ориентированного на поиск решения исходной задачи (1)–(7), методом приведенного градиента [2], решается задача минимизации модифицированной функцией Лагранжа

$$L = \phi\left(x(t_1)\right) - \lambda^{k'}\left[h\left(x(t_1)\right) - \bar{h}^L\right] + \frac{\rho}{2}\left[h\left(x(t_1)\right) - \bar{h}^L\right]'\left[h\left(x(t_1)\right) - \bar{h}^L\right] -$$

$$-\int_{t_0}^{t_1} \mu^{k'}(t)[g(x(t),t) - \bar{g}^L]dt + \frac{\rho}{2}\int_{t_0}^{t_1} [g(x(t),t) - \bar{g}^L]'[g(x(t),t) - \bar{g}^L]dt -$$

$$-\int_{t_0}^{t_1} \gamma^k(t)[c(u,t) - \bar{c}^L]dt + \frac{\rho}{2}\int_{t_0}^{t_1} [c(u,t) - \bar{c}^L]'[c(u,t) - \bar{c}^L]dt,$$

где

$$\bar{h}^L = h\left(x^k(t_1)\right) + h_x\left(x^k(t_1)\right)\delta x(t_1),$$
$$\bar{g}^L = g(x^k(t),t) + g_x(x^k(t),t)\delta x(t),$$
$$\bar{c}^L = c(u^k(t),t) + c_u(u^k(t),t)\delta u(t),$$
$$\delta u = u - u^k,\ \delta x = x - x^k,$$

при линеаризованных ограничениях

$$I^k + \sum_{j=0}^{N} \nabla_u I^k\left(t^j\right)'\left(u_j - u_j^k\right) + \nabla_w I^{k'}(w - w^k) + \nabla_v I^{k'}(v - v^k) = 0,$$

$$J_j^k + \sum_{i=0}^{j}\left[\nabla_u J^k\left(t^j\right)'\left(u_i - u_i^k\right) + \nabla_w J^k\left(t^j\right)'(w - w^k) + \nabla_v J^k\left(t^j\right)'(v - v^k)\right] = 0, j = \overline{0,N}.$$

Прямые ограничения на управление и параметры оставим без изменений:

$$u_j^{\text{н}} \le u_j \le u_j^{\text{в}}, j = \overline{1,N}, \qquad v_j^{\text{н}} \le v_j \le v_j^{\text{в}}, j = \overline{1,n}, w_i^{\text{н}} \le w_i \le w_i^{\text{в}}, i = \overline{1,p}.$$

1. Евтушенко Ю.Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. – М.: Наука, 1982.
2. Тятюшкин А.И. Многометодная технология оптимизации управляемых систем. – Новосибирск: Наука, 2006.

МНОГОМЕТОДНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ПОИСКА РЕШЕНИЯ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ

А. И. Тятюшкин
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
tjat@icc.ru

Наиболее распространенной является задача перевода нелинейного объекта из одного состояния в другое по некоторому заданному критерию качества:

$$I(u)=\int_{t_0}^{t_1} F(x,u,t)\,dt \to \min, \quad \dot{x}=f(x,u,t),$$

$$x(t_0)=x^0, \quad x(t_1)=x^1, \quad x(t)\in R^n, \quad u(t)\in R^r, \quad t\in[t_0,t_1]. \tag{1}$$

В виде (1) формулируются, например, задачи управления маневром и стабилизацией космического аппарата [3].

Для частного класса задач, допускающего явное выражение управления из условия $H_u=0$, построим эффективный алгоритм метода квазилинеаризации [1], для которого хорошее начальное приближение будем находить специальным градиентным методом [2]. После применения принципа максимума будем иметь следующую краевую задачу:

$$\dot{x}=X(x,\psi,t),\ \dot{\psi}=\Psi(x,\psi,t),$$
$$x(t_0)=x^0,\ x(t_1)=x^1. \tag{2}$$

Пусть известно достаточно хорошее начальное приближение, построенное, например, из физических или содержательных соображений. Тогда краевую задачу (2) можно решить методом квазилинеаризации, обеспечивающим высокую точность выполнения краевых условий. На итерациях этого метода рассматривается линеаризованная система

$$\dot{x}^{k+1}=X_x(x^k,\psi^k,t)x^{k+1}+X_\psi(x^k,\psi^k,t)\psi^{k+1}+\rho^k(t), \tag{3}$$
$$\dot{\psi}^{k+1}=\Psi_x(x^k,\psi^k,t)x^{k+1}+\Psi_\psi(x^k,\psi^k,t)\psi^{k+1}+\eta^k(t), \tag{4}$$

где k — номер итерации;

$$\rho^k=X\left(x^k,\psi^k,t\right)-X_x\left(x^k,\psi^k,t\right)x^k(t)-X_\psi\left(x^k,\psi^k,t\right)\psi^k(t),$$
$$\eta^k=\Psi\left(x^k,\psi^k,t\right)-\Psi_x\left(x^k,\psi^k,t\right)x^k(t)-\Psi_\psi\left(x^k,\psi^k,t\right)\psi^k(t).$$

С помощью фундаментальной матрицы

$$\Phi(t)=\begin{bmatrix}\Phi_{11}(t) & \Phi_{12}(t)\\ \Phi_{21}(t) & \Phi_{22}(t)\end{bmatrix},$$

удовлетворяющей $2n$-мерному уравнению

$$\dot{\Phi}=\begin{bmatrix}X_x\left(x^k,\psi^k,t\right) & X_\psi\left(x^k,\psi^k,t\right)\\ \Psi_x\left(x^k,\psi^k,t\right) & \Psi_\psi\left(x^k,\psi^k,t\right)\end{bmatrix}\Phi, \quad \Phi(t_0)=E, \tag{5}$$

решение системы (3), (4), исходящее из начальной точки $\left(x^{k+1}(t_0),\psi^{k+1}(t_0)\right)$, записывается по формулам

$$x^{k+1}(t) = \Phi_{11}(t)x^{k+1}(t_0) + \Phi_{12}(t)\psi^{k+1} + \bar{x}^{k+1}(t),$$

$$\psi^{k+1}(t) = \Phi_{22}(t)x^{k+1}(t_0) + \Phi_{22}(t)\psi^{k+1} + \bar{\psi}^{k+1}(t),$$

(6)

где $\left(\bar{x}^{k+1}(t_0)', \bar{\psi}^{k+1}(t_0)'\right)'$ — частное решение системы (3), (4), соответствующее начальным условиям $\bar{x}^{k+1}(t_0) = 0$, $\bar{\psi}^{k+1}(t_0) = 0$.

Пусть решение (6) удовлетворяет краевому условию

$$\Phi_{11}(t_1)x^0 + \Phi_{12}(t_1)\psi^{k+1}(t_0) + \bar{x}^{k+1}(t_1) = x^1.$$

Тогда новое приближение для вектора начальных условий сопряженной системы $\psi(t_0)$ найдем по формуле

$$\psi^{k+1}(t_0) = \Phi_{12}^{-1}(t_1)\left[x^1 - \Phi_{11}(t_1)x^0 - \bar{x}^{k+1}(t_1)\right]. \qquad (7)$$

Интегрируя систему (2) при начальных условиях $x(t_0) = x^0$, $\psi(t_0) = \psi^{k+1}(t_0)$, получим точку $x^{k+1}(t_1)$, которая удовлетворяет неравенству

$$\left\| x^{k+1}(t_1) - x^1 \right\| < \left\| x^k(t_1) - x^1 \right\|.$$

Для получения первого приближения $\psi(t_0) = \mathrm{v}^k$, достаточно близкого к искомому вектору $\psi^*(t_0)$, построим градиентную процедуру, не требующую хорошего начального приближения для сходимости итерационного процесса.

Введем функционал $I_1(\mathrm{v}) = \frac{1}{2}\left\| x(t_1, \mathrm{v}) - x^1 \right\|^2$, который является мерой уклонения решения системы (2) с начальными условиями $x(t_0) = x^0$, $\psi(t_0) = \mathrm{v}$ от заданной точки x^1, и поставим задачу поиска $\mathrm{v}^* = \arg\min_{\mathrm{v} \in R^n} I_1(\mathrm{v})$. Поскольку теперь будет решаться задача со свободным правым концом, решение сопряженной системы $\psi(t)$ должно удовлетворять условию трансверсальности

$$\psi(t_1) = x^1 - x(t_1, \mathrm{v}). \qquad (8)$$

Построим функционал невязок

$$I(\mathrm{v}) = I_1(\mathrm{v}) + \frac{1}{2}\left\| \psi(t_1) + x(t, \mathrm{v}) - x^1 \right\|^2 \qquad (9)$$

и будем рассматривать задачу минимизации функционала (9) на решениях системы (2) с начальными условиями $x(t_0) = x^0$, $\psi(t_0) = \mathrm{v}$. Градиент функционала (9) по параметрам $(\mathrm{v}_1, \mathrm{K}, \mathrm{v}_n)$, определяющим начальные условия системы (2), вычисляется через решение системы, сопряженной к (2):

$$\begin{aligned}
&\dot{\xi} = -X_x'(x, \psi, t)\xi - \Psi_x'(x, \psi, t)\varsigma, \\
&\dot{\varsigma} = -X_\psi'(x, \psi, t)\xi - \Psi_\psi'(x, \psi, t)\varsigma, \\
&\xi(t_1) = 2\left(x^1 - x(t_1, v) - \psi(t_1)\right), \\
&\varsigma(t_1) = x^1 - x(t_1, v) - \psi(t_1),
\end{aligned}$$

и равен $\nabla I(\mathrm{v}) = -\varsigma(t_0)$. С помощью градиентной процедуры найдем начальное приближение для метода квазилинеаризации.

1. Беллман Р., Калаба Р. Квазилинеаризация и нелинейные краевые задачи. М.: Мир, 1968.
2. Тятюшкин А.И. Многометодная технология оптимизации управляемых систем. — Новосибирск: Наука, 2006.
3. Junkins J.I., Turner J.D. Optimal continuous torque attitude maneuvers // AIAA / AAS Astrodynamics conference. – Palo Alto, Calif., 1978.

НЕЛИНЕЙНЫЙ МЕТОД ПРИВЕДЕННОГО ГРАДИЕНТА ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ*

А. И. Тятюшкин, А. Ю. Горнов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Редкая прикладная задача траекторной оптимизации обходится без фазовых ограничений, точнее говоря, без фазовых ограничений–неравенств $g(x,u,t) \le 0$. (Если в исходной постановке имелись ограничения–равенства, то несложно выразить через них одно из управлений и, тем самым, понизить размерность задачи и задать траектории, гарантировано выполняющие требование ограничения–равенства). Но для выполнения неравенств необходимо найти оптимальные интервалы, на которых эти ограничения активны; эта задача, как правило, нетривиальна.

Среди популярных инструментов работы с фазовыми ограничениями можно указать заимствованные в теории математического программирования методы внешних штрафных функционалов и модифицированных функционалов Лагранжа (см., напр., [1]); их применение во многих случаях при невысоких требованиях к точности приводит к достижению успеха. Есть еще менее известный, и довольно капризный, метод точных дифференцируемых штрафных функционалов (см., напр., [2]), в результате применения которого, по нашим сведениям, в алгоритмах оптимального управления обычно затруднено вследствие чрезвычайно плохой обусловленности его вспомогательных задач (см., напр., [3–5]). Но при высоких требованиях к точности выполнения фазовых ограничений единственным адекватным инструментом является, на наш взгляд, нелинейный метод приведенного градиента.

Общая идея подхода во многом схожа с методикой работы с равенствами: сначала необходимо аналитически найти управление $\overline{u}_l(t)$, позволяющее скользить по ограничениям. Это легко получается, если в формулировке ограничения присутствует управление ($g(x,u,t) \le 0$, обычно в таком случае принято говорить о смешанных ограничениях). Если же ограничение не содержит управление в явном виде $(g(x,t) \le 0)$, следует последовательно производить дифференцирование ограничения до тех пор, пока управление не появится (при адекватной постановке задачи это всегда возможно сделать). Далее строится двухуровневый алгоритм, верхний уровень которого составляет итерационное уточнение $I_g(t), t \in [t_0, t_1]$ участков активности ограничения $g(x,u,t) \le 0$, а нижний – оптимизация системы при управлениях, фиксированных на участках $I_g(t)$. Траектория движется свободно до момента касания ограничения, после чего происходит переход к совершенно другой динамике, позволяющей системе скользить вдоль допустимой границы. Нахождение момента схода с границы определяется интересами оптимизируемого функционала.

Свойства рассматриваемого алгоритма, как и других высокоточных методов, к сожалению, не являются регулярными. Во-первых, возможен локальный «конфликт

* Работа выполнена за счет субсидии Минобрнауки России в рамках проекта «Теория и методы исследования эволюционных уравнений и управляемых систем с их приложениями» (№° гос. регистрации: 121041300060-4).

ограничений», который выражается в том, что получаемые на итерациях $\bar{u}_l(t)$ не удовлетворяют $u \in U$. В такой ситуации выходом может послужить конструирование методов, допускающих локальное нарушение ограничения $u \in U$ и обеспечивающих попадание управлений в допустимый параллелепипед только в конце итеративного процесса. Во-вторых, генерируемая двухуровневым алгоритмом последовательность значений суммарного функционала, в общем случае, не является монотонной, при каждом изменении $I_g(t)$ происходит скачкообразное изменение управления, так как вариация первого уровня принципиально не обладает свойствами малости. Второе свойство алгоритма можно считать критическим потому, что, как правило, в таком виде не наблюдается сходимости последовательности управлений к оптимальному. Для получения свойства квазимонотонности последовательности, и, следовательно, корректно работающего алгоритма, требуется регуляризация процесса. В качестве регуляризатора возможно использовать стандартный квадратичный штрафной функционал, коэффициент штрафа в котором может сразу быть выбран довольно большим; в данном случае штрафная компонента выполняет роль не столько удовлетворения ограничению, сколько удержания траектории вблизи от точек касания.

Реализация алгоритма предполагает разработку специализированного варианта метода интегрирования прямой системы, приведенного ниже.

1. Выбирается $u^K(t)$, $t \in T$.

2. Вычисляется вспомогательное управление $\bar{u}_p(t) = \pi(x, u_j, t)$, $j = \overline{1,r}$, $j \neq p$.

3. В цикле по τ от t_0 до t_1 с шагом h:

3.1. Выбирается $v(\tau) = u^K(\tau)$.

3.2. Делается один шаг метода интегрирования, получается $x(\tau + h)$.

3.3. Если $g(x(\tau + h), v(\tau), \tau) \le 0$, производится переход на шаг 4.

3.4. Если $g(x(\tau + h), v(\tau), \tau) > 0$, корректируется управление, полагается $v(\tau) = \bar{u}_p(\tau)$.

3.5. Снова делается один шаг метода интегрирования; вычисляется $\bar{x}(\tau + h)$.

4. Заканчиваются операции на шаге τ.

Алгоритм завершен.

Вышеописанный подход легко обобщается на случай двухсторонних и многомерных фазовых ограничений и позволяет сконструировать эффективные высокоточные алгоритмы для задач с фазовыми ограничениями.

Результатами работы обсуждаемого алгоритма являются: а) управление, состоящее из кусков $u^K(t)$ на участках неактивности фазового ограничения и кусков $\bar{u}_p(\tau)$ на участках, где фазовые ограничения нарушаются; б) соответствующая траектория, незначительно нарушающая фазовые ограничения. Построенное кусочно-непрерывное управление, при условии улучшения целевого функционала, используется на следующей итерации общего алгоритма оптимизации в качестве $u^{K+1}(t)$.

Метод нелинейного приведенного градиента для сходимости требует, кроме мощного регуляризатора, наличия также хорошего начального приближения. По результатам работы метода получаются траектории, аппроксимирующие оптимальные и нарушающие фазовые ограничения с точностью порядка

погрешностей метода интегрирования, что недоступно никаким другим из известных подходов.

1. Бертсекас Д. Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа. М.: Радио и связь, 1987.
2. Еремин И.И. Теория линейной оптимизации. Екатеринбург: Институт математики и механики УрО РАН, 1999.
3. Жолудев А.И., Тятюшкин А.И., Эринчек Н.М. Численные методы оптимизации управляемых систем // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1989. № 4. С. 14–31.
4. Tyatyushkin A.I. Numerical Optimization Methods for Controlled Systems with Parameters // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2017. Vol. 57, №10. P. 1592–1606.
5. Tyatyushkin A.I. Multimethod control optimization // Journal of Advanced Research in Natural Science. 2022. №16. P. 4–14.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ КОНТЕКСТА ИЗ РЕПОЗИТОРИЕВ КОДА НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

К. Р. Фёдоров
Университет ИТМО
k.fedorov@niuitmo.ru

Современные инструменты генерации кода на основе больших языковых моделей (LLM) преимущественно работают в пределах одного файла, что ограничивает их способность учитывать межфайловые зависимости. Между тем связи между функциями, классами и модулями часто определяют смысл и использование кода. Одним из способов расширения контекста является извлечение релевантных фрагментов кода на уровне всего репозитория. В данной работе рассматривается подход, основанный на представлении репозитория в виде гетерогенного графа и использовании графовых нейронных сетей для построения эмбеддингов элементов кода, что позволяет извлекать контекст с учётом структурных зависимостей.

Постановка задачи. Проблема извлечения контекста из репозитория может быть формализована как функция:

$$retrieve\colon G \times Q \to V'$$

Где Q — это множество текстовых запросов пользователя, а G — это граф кодового репозитория. Для заданного запроса наша функция должна вернуть подмножество узлов $V' \subseteq V$, которые будут считаться наиболее релевантными для вопроса пользователя.

Репозиторий программного кода представляется в виде гетерогенного ориентированного графа $G = (V, E, T_V, T_E, D)$ где:

- V — множество узлов, включающие узлы типов A = {FILE, CLASS, FUNCTION}
- $E \subseteq V \times V$ — множество направленных рёбер с типами связей R = {IMPORT, OWNER, CALL, INHERITED}
- $T_V\colon V \to A$ отображение каждого узла в его тип
- $T_E\colon E \to R$ отображение каждого ребра в его тип
- $D = \{d_v\}_{v \in V}$ означает множество исходных признаков узлов.

Для построения графового представления репозиториев использовался парсер SemanticGraphParser, выполняющий статический анализ Python-кода на основе абстрактного синтаксического дерева (AST). Инструмент был расширен для извлечения сигнатур функций и docstring-комментариев, что позволило формировать узлы трёх типов (файл, класс, функция) и рёбра, отражающие отношения владения, вызова, импорта и наследования. Корректность извлечённых связей была подтверждена при ручной проверке случайной выборки из восьми репозиториев.

Интуиция предлагаемого метода извлечения заключается в том, что смысл и назначение функции во многом определяются контекстом её использования — другими элементами кода, с которыми она взаимодействует (например, вызываемыми или вызывающими функциями). Для реализации этой идеи используются графовые эмбеддинги, полученные при помощи графовой нейронной сети GraphSAGE [1], которая агрегирует информацию от соседних узлов и учитывает типы связей между элементами репозитория. Модель обучается так, чтобы векторы запросов и эмбеддинги релевантных им узлов располагались близко друг к другу в пространстве признаков по косинусному сходству. Извлечение контекста выполняется путём выбора топ-k узлов, наиболее близких к вектору запроса пользователя.

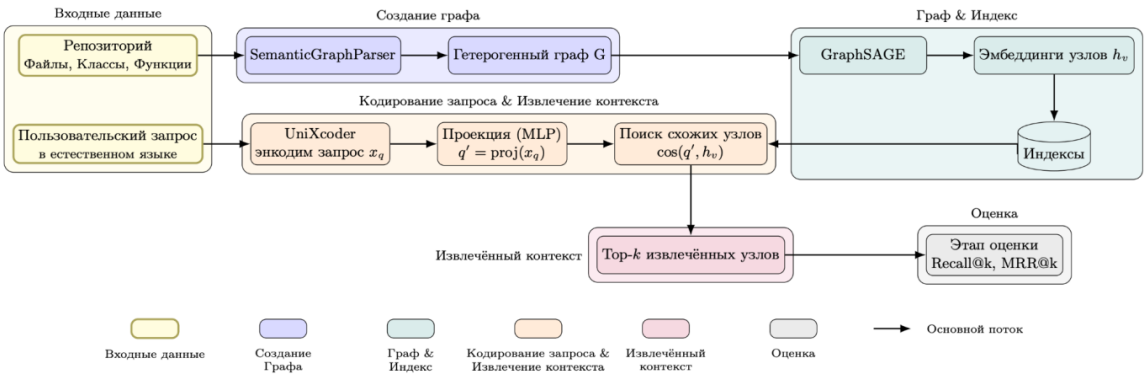


Рисунок 1. Общая схема метода

Эффективность предложенного метода оценивалась на задаче извлечения релевантных элементов кода по их текстовому описанию. Эксперименты проводились на данных из RepoBench [2], включающем 1451 Python-репозиториев различных размеров и предметных областей. В качестве текстовых запросов использовались код функций или docstring-описания функций, а в качестве целевых элементов — функции, вызываемые из соответствующих функций с описанием. Таким образом, модель должна была определить, какие участки кода с наибольшей вероятностью участвуют в реализации описанного поведения.

Таблица 1 – Метрики

	Запрос в виде кода		Запрос в виде docstring	
Model	Recall@5	MRR@5	Recall@5	MRR@5
KNN	0.199304	0.168072	0.190836	0.158406
GraphSAGE с 3 слоями	0.675642	0.227222	0.403165	0.116296
GraphSAGE с 5 слоями	0.692699	0.236872	0.372606	0.103692
GraphSAGE с 7 слоями	0.696718	0.253803	0.357146	0.118612

Предложенный графовый метод на основе GraphSAGE показал существенное улучшение полноты извлечения (Recall@5) по сравнению с базовым подходом KNN, что подтверждает пользу учёта структурных связей между элементами кода. При этом значения MRR оказались немного ниже, что может указывать на смещение релевантных узлов в более низкие позиции рейтинга.

В целом результаты демонстрируют, что графовое моделирование репозитория обеспечивает более информативные представления кода и улучшает релевантность поиска функций.

1. Hamilton W. L., Ying R., Leskovec J. Inductive representation learning on large graphs // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). — 2017. — Vol. 30.

2. Liu T., Xu C., McAuley J. RepoBench: Benchmarking repository-level code auto-completion systems // Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). — 2024. — P. 47832–4750. — URL: https://proceedings.iclr.cc/paper_files/paper/2024/file/d191ba4c8923ed8fd8935b7c98658b5f-Paper-Conference.pdf

АНАЛИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СНИМКОВ SENTINEL-2 ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ*

Р. К. Фёдоров, А. К. Попова, Ю. В. Авраменко
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
fedorov@icc.ru

Мониторинг сельскохозяйственных земель с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является важным источником своевременной информации для агрономического и экологического управления. В последние годы наблюдается значительный рост интереса к применению технологий ДЗЗ для мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий, что связано с необходимостью повышения продуктивности и устойчивости сельского хозяйства в условиях изменения климата и растущего спроса на продовольствие. Технологии дистанционного зондирования позволяют получить подробную информацию о состоянии почвы, растений и изменениях окружающей среды, что способствует своевременному выявлению таких проблем, как засуха и деградация земель. Оперативное отслеживание изменения состояния земель помогает контролировать севооборот и использование сельскохозяйственных субсидий [1].

Для идентификации отдельных сельскохозяйственных культур в современных исследованиях широко используются временные ряды спутниковых снимков. Использование временных рядов помогает распознавать цикл роста сельскохозяйственных культур и их спектральные характеристики отклика [2].

В работе рассматривается применение LSTM архитектуры нейронной сети для классификации мультиспектральных космоснимков Sentinel-2 [3, 4]. В рамках исследования сформирована обучающая выборка на основе данных Министерства сельского хозяйства Иркутской области. Образец обучающей выборки представляет собой упорядоченную последовательность фрагментов изображений за период с 10 апреля по 18 сентября. Период был установлен на основе анализа динамики индекса NDVI в рамках вегетационного периода. Каждый фрагмент представляет изображение 16x16 пикселей, 9 каналов, нормализованных к интервалу (0;1) с помощью параметров Dynamic world [5].

Определяется последовательность фрагментов изображений длиной 7 элементов, где каждый элемент соответствует определенной дате с шагом в 15 дней. Иркутская область характеризуется большим количеством облачных дней. Наличие облаков приводит к необходимости отбраковки некоторых фрагментов изображений. Для каждого элемента последовательности подбирается ближайший по дате безоблачный фрагмент. Критерий облачности фрагмента изображения определяется достаточно просто: если максимальная яркость каналов превышает установленный порог, данный фрагмент отбрасывается.

Архитектура нейронной сети состоит из трех сверточных слоев Conv2d, слоя ConvLSTM2d и слоя Conv2d с функцией активации softmax. На вход нейронной сети подается тензор размером 7x16x16x9. На выходе тензор размером 16x16x10, где для

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

каждого пикселя получаем вероятности классов. Обучение проводилось на 10 классах по 815 образцов в каждом. В результате верификации полученной модели получены следующие оценки:

- категориальная точность модели 81.42%";
- по метрике precision@12 точность модели 83.82%;
- по метрике recall@12 80.29%.

Точность расчетов показала, что результаты классификации могут применяться для решения актуальных задач Байкальской природной территории, в частности, для анализа эффективности выделения субсидий Министерства сельского хозяйства, инвентаризации сельхозугодий и т.д.

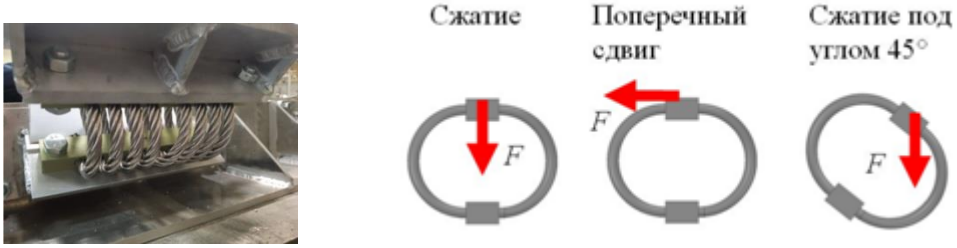
1. Воробьёва, Н.С. Информационная технология раннего распознавания видов сельскохозяйственных культур по космическим снимкам / Н.С. Воробьёва, В.В. Сергеев, А.В. Чернов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 929-938. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-929-938.
2. N. Wang, Y.G. Zhai, L.F. Zhang. Automatic cotton mapping using time series of Sentinel-2 images // Remote Sens. (Basel), 13 (2021), p. 19.
3. Yi, Z.; Jia, L.; Chen, Q.; Jiang, M.; Zhou, D.; Zeng, Y. Early-Season Crop Identification in the Shiyang River Basin Using a Deep Learning Algorithm and Time-Series Sentinel-2 Data. Remote Sens. 2022, 14, 5625. https://doi.org/10.3390/rs14215625
4. Khan, W., Minallah, N., Sher, M., Khan, M. A., Rehman, A. U., Al-Ansari, T., & Bermak, A. (2024). Advancing crop classification in smallholder agriculture: A multifaceted approach combining frequency-domain image co-registration, transformer-based parcel segmentation, and Bi-LSTM for crop classification. PloS ONE, 19 (3)): e0299350. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299350
5. Brown, C.F.; Brumby, S.P.; Guzder-Williams, B.; Birch, T.; Hyde, S.B.; Mazzariello, J.; Czerwinski, W.; Pasquarella, V.J.; Haertel, R.; Ilyushchenko, S.; et al. Dynamic World, Near Real-Time Global 10 m Land Use Land Cover Mapping. Sci. Data 2022, 9, 251.

ПРИБЛИЖЕННОЕ ПОДОБИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ВЗАИМНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ДИАГРАММ ТРОСОВЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ

Ю. Ф. Филиппова, С. В. Доронин
Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
filippovajf@ict.nsc.ru, sdoronin@ict.nsc.ru

Строгие применения теории и критериев подобия основаны на концепции обобщенных переменных в безразмерных комплексах [1, 2]. Они не всегда возможны в прикладных задачах по разным причинам, в том числе из-за неточного совпадения интересующих исследователя признаков объектов, неполной или искаженной информации об их характеристиках. Однако предположение о наличии подобия между объектами оказывается настолько эффективной предпосылкой решения прикладных задач, что вводятся различные допущения, методы и технологии, смягчающие требования к строгости получаемых выводов и результатов. В этих случаях говорят о стохастическом [3], нечетком [4], приближенном [5] и других видах нестрогого подобия. В этом случае выводы, основанные на применении идей о подобии объектов, сопровождаются теми или иными количественными оценками отклонения от строгого подобия [6].

Материальным объектом исследования являются тросовые виброизоляторы. Они состоят из двух планок, соединенных тросом сложной пространственной конфигурации (рис. 1а). Трос выполняет функцию упруго-демпфирующего элемента. Основной характеристикой тросового виброизолятора является его жесткость, определяемая для ограниченного (от трех до шести) числа схем нагружения (рис. 1б). Она описывается нагрузочной диаграммой – нелинейной взаимосвязью между прилагаемой к планке силы F и ее перемещением s вдоль направления действия силы (рис. 2а).

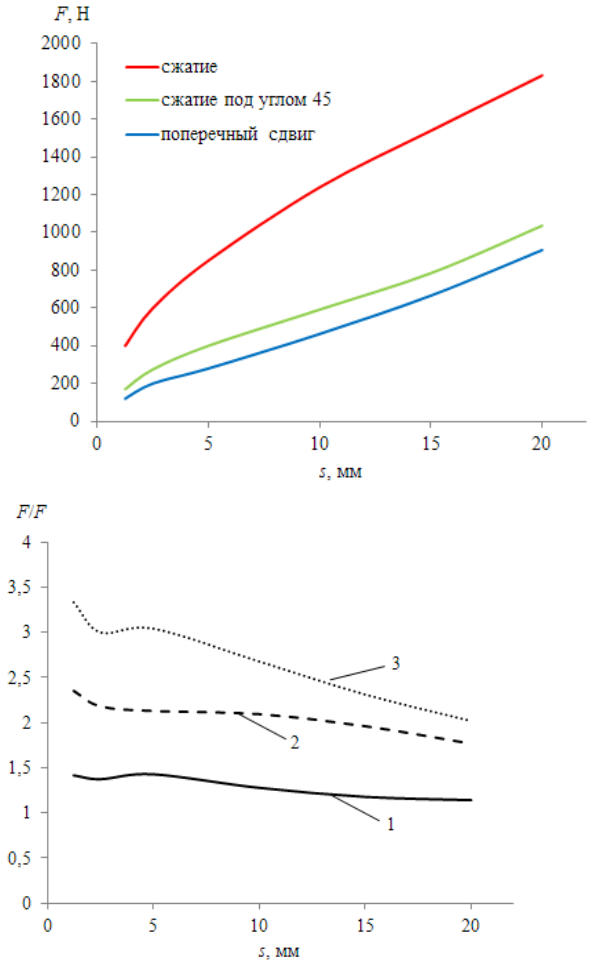


(а) (б)

Рисунок 1. Общий вид (а) и некоторые типовые схемы нагружения (б)

Общим для семейства трех кривых (графиков нагрузочных диаграмм) является монотонный рост силы F по мере увеличения перемещений s, а также то, что они соответствуют одному и тому же материальному объекту. Поскольку жесткости этого объекта в разных направлениях определяются одним и тем же фактором – конфигурацией и поперечным сечением троса в составе виброизолятора, то между ними предполагается наличие взаимосвязи. Тогда, полагая кривые нагрузочных диаграмм подобными, оценим в качестве величины подобия соотношения жесткостей (или, что то же самое, соотношения сил F/F при одинаковых значениях перемещений s) для разных схем нагружения (рис. 2б). Эти соотношения можно рассматривать в

качестве аналога масштаба подобия, который с некоторой погрешностью позволяет осуществлять взаимные преобразования одних графиков в другие. Как видно из рис. 2б, за исключением начального участка соотношения жесткостей описываются зависимостями, близкими к линейным.



(а) (б)

Рисунок 2. Нагрузочные диаграммы (а) и соотношения жесткостей (б) виброизолятора ВМТ-85 компании Астрон: 1 – для сжатия под углом 45° и сдвига; 2 – для сжатия и сжатия под углом 45°; 3 – для сжатия и сдвига

Тогда масштаб подобия описывается интервалами [1,1…1,4] с коэффициентом осцилляции 24% для сжатия под углом 45° и сдвига, [1,8…2,4] с коэффициентом осцилляции 29% для сжатия и сжатия под углом 45, [2,0…3,3] с коэффициентом осцилляции 49% для сжатия и сдвига.

Анализ выполнен для большого количества типоразмеров и конструктивных решений тросовых виброизоляторов разных производителей: 11 штук ООО «Виброника» (Россия), 27 штук научно-производственной компании Астрон (Россия), 5 штук корпорации Hutchinson (Франция), 90 штук компании Enidine (США).

В докладе рассматриваются выявленные в результате анализа тенденции и закономерности, приводятся количественные оценки взаимного преобразования нагрузочных диаграмм.

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987.430 с.
2. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: «Высшая школа», 1973. 296 с.

3. Северцев Н.А., Дарьина А.Н. Построение моделей стохастического подобия в исследовании работоспособности робототехнических систем // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. 2018. № 20. С. 72-81.
4. Закутнева Л.Н., Мякушко В.В. Оценка нечеткого подобия // Наука и бизнес: пути развития. 2017. № 1 (67). С. 8-14.
5. Надежность и эффективность в технике: Справочник: в 10 т. / Ред. Совет.: В.С. Авдуевский и др. – М.: Машиностроение, 1987 – Т.4.: Методы подобия в надежности / Под общ. Ред. В.А. Мельникова, Н.А. Северцева. 280 с.
6. Егоров В.В. Определение масштаба жесткости и оценка степени неподобия упругих моделей крыльев малого удлинения // Ученые записки ЦАГИ. 1972. Т. 3, № 5. С. 124-126.

О ФУНКЦИОНАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЯХ С РАЗРЫВНОЙ ПРАВОЙ ЧАСТЬЮ*

И. А. Финогенко
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
fin@icc.ru

Исследования имеют своей целью перенесение основных результатов и методов общей теории обыкновенных дифференциальных уравнений с разрывной правой частью на функционально-дифференциальные уравнения с разрывной правой частью с использованием специального класса инвариантно дифференцируемых функционалов при описании многообразий точек разрыва и скользящих режимов систем с последействием.

Под обыкновенным дифференциальным уравнением (ОДУ) с разрывной правой частью (кратко – разрывным дифференциальным уравнением) понимается система уравнений

$$\dot{x} = f(t,x), \quad x(t_0) = x_0, \tag{1}$$

где $f = (f_1, \dots, f_n)$ – функция, разрывная по совокупности аргументов $(t,x) \in R^{n+1}$. Наиболее общий класс уравнений (1) с разрывной по t и непрерывной по x функ- цией $f(t,x)$ описывают условия Каратеодори, когда эта функция измерима по t и непрерывна по x. Такие уравнения называются уравнениями Каратеодори и хорошо изучены с применением обычных методов теории обыкновенных дифференциальных уравнений.

Ситуация меняется принципиально, если функция $f(t,x)$ разрывна по переменной x и встает вопрос о том, какими свойствами множество M точек разрыва функции f должно обладать. Наиболее общим является свойство нулевой меры Лебега и в прикладных задачах, как правило, M – гиперповерхности.

Теория ОДУ с разрывной правой частью в настоящее время хорошо разработана [1]. Она находит применение в теории автоматического регулирования (например, для систем с релейными характеристиками), а также для систем, в которых разрывные нелинейности обусловлены физическими законами (например, для систем с сухим трением).

Основные подходы к изучению разрывных ОДУ без запаздывания так или иначе связаны с теорией дифференциальных включений и явились предметом дискуссии на 1-ом конгрессе ИФАК по докладу А.Ф. Филиппова, который послужил толчком к началу систематического изучения разрывных систем. Детальный анализ упомянутой выше дискуссии имеется в статьях [2].

Укажем на проблемы, которые возникают в разрывных системах с запаздыванием.

Функциональная природа систем с запаздыванием хорошо известна, начиная с известных работ Н.Н. Красовского, связанных с прямым методом Ляпунова. В отличие от систем без запаздывания здесь возникают проблемы (по крайней мере формально) с вычислением производных функционалов Ляпунова-Красовского вдоль решений, т. к. для этого нужно знать сами решения. При описании скользящих режимов функционально-дифференциальных уравнений с разрывными правыми частями возникает такая же проблема.

Мы исследуем функционально-дифференциальное уравнение

* Работа выполнена в рамках проекта № 1210401300060-4 Минобрнауки РФ.

$$\dot{x} = f\big(t, x_t(\cdot)\big), \;\; x_{t_0}(\cdot) = \varphi_0(\cdot), \tag{2}$$

где $f: R^1 \times C_\tau \to R^n$ – разрывная функция, R^n – n-мерное векторное пространство с нормой $\|\cdot\|$, C_τ – пространство всех непрерывных функций $\varphi(\cdot)$, определенных на отрезке $[-\tau, 0]$ со значениями в R^n с обычной sup-нормой $||\varphi(\cdot)||_C = \sup_{-\tau\le\theta\le 0} ||\varphi(\theta)||, x_t(\theta) = x(t+\theta), \; -\tau \le \theta \le 0$.

Для систем без запаздывания множество точек разрыва правой части в общем случае представляет собой множество нулевой меры Лебега.

В наших исследованиях функция f разрывна на множестве точек $M \subset R1 \times C\tau$. Движения системы (2) по множеству M по аналогии с разрывными системами без запаздывания также будем называть скользящими режимами.

Возникают следующие вопросы.

Какими свойствами в общем случае должно обладать множество M точек разрыва правой части уравнения (2) для того, чтобы для стали возможными простейшее выпуклое доопределение и другие подходы, связанные с использованием предельных значений правых частей уравнений и теории функционально-дифференциальных включений?

Для каких множеств M и какими будут содержательные условия существования скользящих режимов для уравнения (2) с кусочно непрерывной правой частью?

Каким может быть аналог метода эквивалентных управлений для системы

$$\dot{x} = f(t, x_t(\cdot), u_1, \dots, u_k)$$

и как получить уравнения для определения эквивалентных управлений в функциональным фазовым пространством $C\tau$?

Наши исследования посвящены комплексному изучению этих вопросов.

1. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. М.: Наука, 1985. 224 с.
2. Айзерман М.А., Пятницкий Е.С. Основы теории разрывных систем. 1.2 // Автоматика и телемеханика. 1974. № 7. С. 33–47; 1974. № 8. С. 39–61.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ЧАСТИЦ В СВЯЗАННЫХ ПОРАХ*

Б. В. Хабитуев, В. Е. Архинчеев, С. П. Мальцев, Д. Ф. Дерюгин
Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
bairkhabituev@bsu.ru

1. Описание численного эксперимента

Рассмотрим имитационную модель диффузии частиц, основанную на вероятностной модели диффузии [1, 2]. Частицы двигаются в ограниченной двумерной области, которая представляет собой связанные прямоугольные области (рисунок 1).

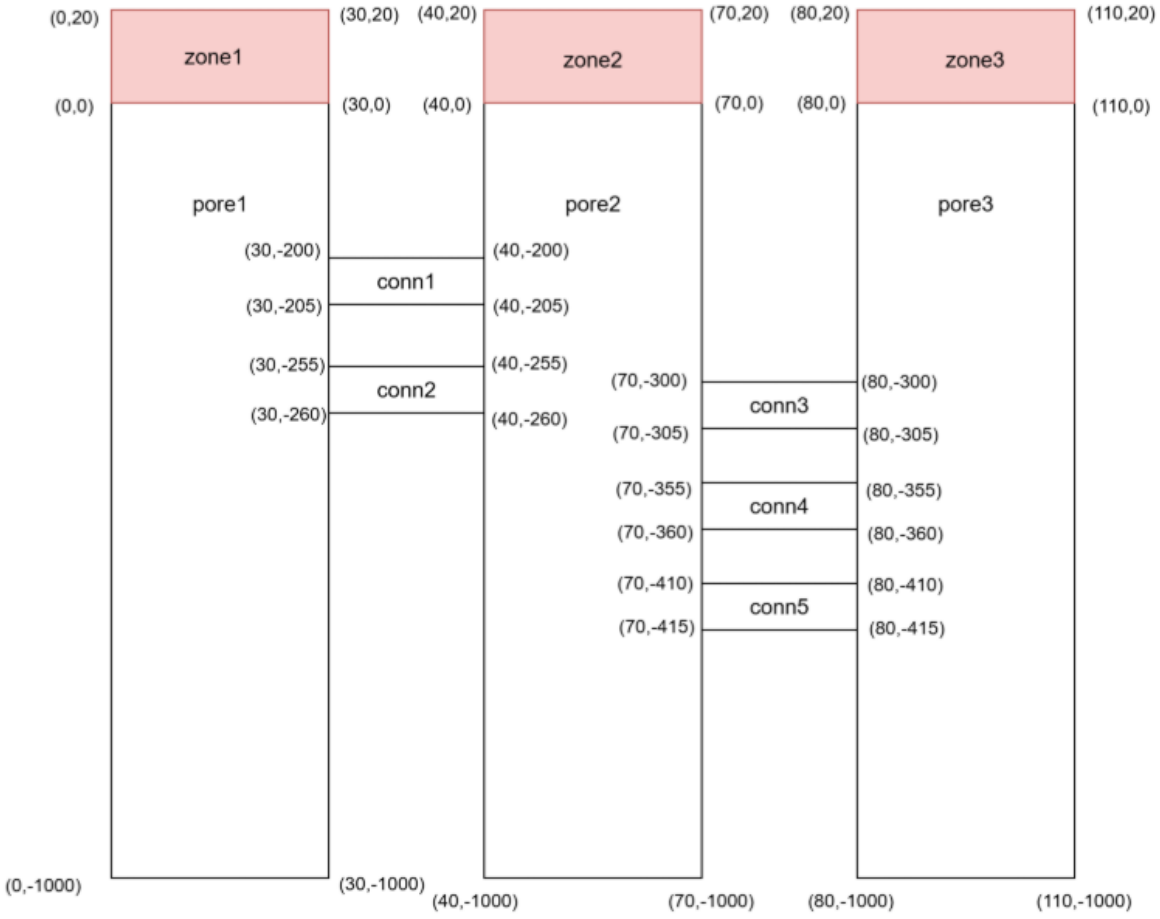


Рисунок 1. Область движения частиц

Красные прямоугольники – буферные зоны с первоначальным посевом частиц (по 200 в каждой), цифрами обозначены поры (1-3) и коридоры между ними (4-8). Коридоры, буферы и поры имеют одинаковые размеры (в условных единицах):

1. Поры: высота = 1000, ширина = 30;
2. Коридоры: высота = 5, ширина = 10;
3. Буферы: высота = 20, ширина = 30.

* Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда No 24-21-00356, https://rscf.ru/project/24-21-00356/

Частицы двигаются по осям координат и диагоналям выбор случайным образом:

1. На каждой итерации случайно выбирается одно из 8 направлений движения (пока находимся в буфере нельзя двигаться “вверх”);
2. Определяется новая координата, равная смещению по выбранному; направлению на 1 (если диагональ, то на 1 по вертикали и горизонтали);
3. Если координата свободна, частица перемещается в эту координату;
4. Если координата находится на границе, то частица остается на месте;
5. Если в ней находится другая частица, то остаётся на месте.

Было проведено 20 запусков алгоритма, в каждом запуске по 2,500,000 итераций, с шагом 100,000 производилась запись координат частиц. Также для каждой частицы фиксировались переходы между блоками (порами и коридорами): итерация – название блока.

2. Ключевые результаты и анализ

2.1 Динамика переходов между порами

Общая активность: Подавляющее большинство частиц активно перемещается между порами. Среднее количество *всех переходов (*включая возвраты в исходную пору) на одну частицу за 2.5 млн итераций составило ~930, а *полных переходов* (смена поры) ~298.

«Застрявшие» частицы: Количество частиц, ни разу не сменивших стартовую пору, незначительно и быстро уменьшается со временем. После 1.3 млн итераций такие частицы практически исчезают (в среднем менее 1 на запуск), что демонстрирует высокую связность системы.

Линейный рост числа переходов: Количество полных переходов на частицу демонстрирует линейную зависимость от числа итераций как для среднего значения, так и для медианы. Это указывает на установившийся, стационарный характер процесса диффузии после начального переходного периода.

2.2 Пространственное распределение частиц

Стабилизация распределения: Анализ положения частиц относительно их стартовой поры показывает, что после ~1 млн итераций система выходит на квазистационарное состояние.

Конечное распределение: В установившемся режиме частицы распределяются между порами приблизительно в следующей пропорции:

- 33% (200 частиц) находятся в своей стартовой поре,
- 45% (273 частицы) — в соседней поре,
- 21% (125 частиц) — в противоположной поре.

Рисунок 2 демонстрирует стабилизацию распределения положения частицы (поры) относительно стартовой.

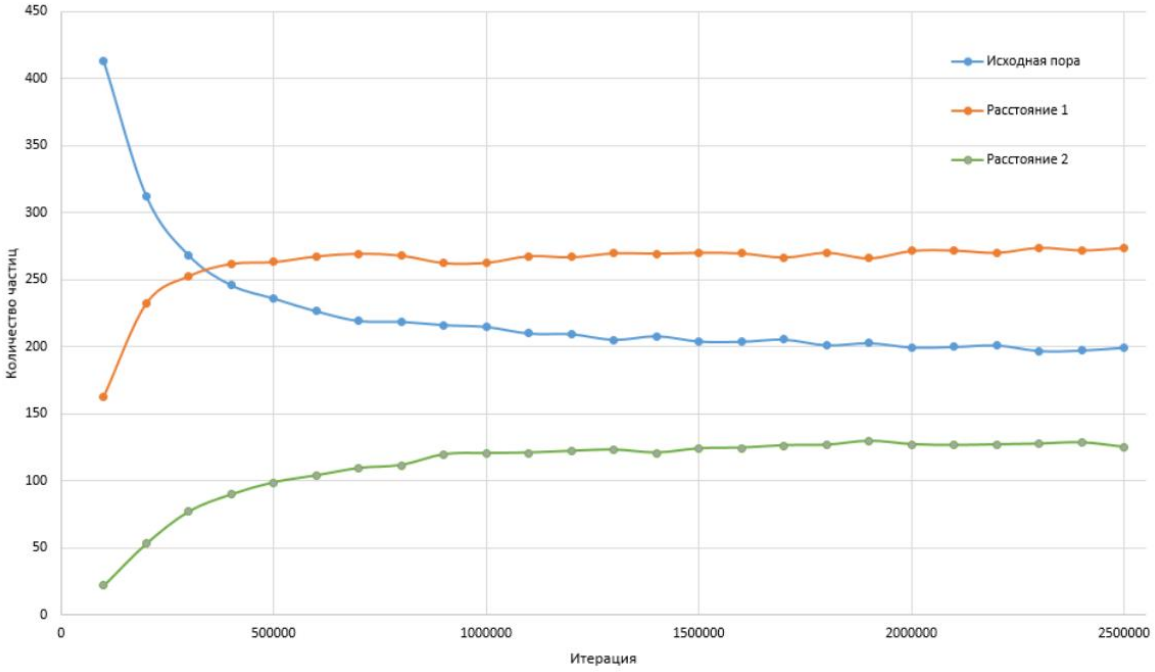


Рисунок 2. «Смещение» частицы относительно стартовой поры

На рисунке 2 приведена статистика нахождения частиц относительно стартовой поры, исходная пора – частица вернулась в стартовую пору, расстояние 1 – частица сместилась в соседнюю пору, расстояние 2 – частица из левой поры переместилась в правую (и наоборот).

Доля в коридорах: Количество частиц, находящихся в соединительных коридорах, стабильно составляет около 1-2 (~0.3%), что подтверждает их роль именно как каналов для перемещения, а не как зон накопления.

1. Рязанов Г.В. Случайные блуждания на плоской решетке с ловушками//Теоретическая и математическая физика. 1972. Т.10. С. 271-277. DOI: 10.1007/BF01090731
2. Arkhincheev VE, Khabituev BV, Maltsev SP. Numerical Simulation of Capture of Diffusing Particles in Porous Media. *Computation*. 2025; 13(4):82. https://doi.org/10.3390/computation13040082

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ КОДИРОВАНИЯ В ДИАПАЗОННОЙ АСИММЕТРИЧНОЙ СИСТЕМЕ СЧИСЛЕНИЯ

Хам Сен Чхор, Ким Ми Сун, Ким Хе Сен, О Зун Бон
Факультет программирования,
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
ojb89925@star-co.net.kp

Предложена формула кодирования в диапазонной асимметричной системе счисления (rANS) в прежних работах [1-2]:

$$C(s,x) = M\left\lfloor\frac{x}{f_s}\right\rfloor + b_s + mod(x, f_s) \quad (1)$$

где s – некий символ в входном ряде символов; x – значение предыдущего состояния символа s, M – сумма частоты появления $(f_s > 0)$ символов s; b_s – $b_s = \sum_0^s f_s$.

[теорема 1] Для удовлетворения выражения $\left\lfloor\frac{x}{f_s}\right\rfloor$=$\lfloor func_{f_s}\rfloor * x \gg m$ обязательно существуют некое целое число m и $\lfloor func_{f_s}\rfloor$, рассчитанные по уравнениям:

$$\lfloor func_{f_s}\rfloor = \left\lfloor\frac{2^{m-1}}{f_s}\right\rfloor + 1 \quad (2)$$

$$m \geq 32 + \log_2 f_s \quad (3)$$

[доказательство]

В формуле (1) предположим, что $\left\lfloor\frac{x}{f_s}\right\rfloor$ равно просто q, т.е. $q = \left\lfloor\frac{x}{f_s}\right\rfloor$.

Из формулы (1) получается $C(x,s) = q * M + b_s + (x - q * f_s)$, следовательно, получается следующая формула:

$$C(x,s) = q * (M - f_s) + b_s + x \quad (4)$$

Сначала изменим форму формулы путём умножения 2^m на числителя и знаменателя выражения (q), соответственно:

$$\mathrm{q} = \left\lfloor\frac{x}{f_s}\right\rfloor = \left\lfloor\frac{2^m * x}{2^m * f_s}\right\rfloor = \left\lfloor\frac{\frac{2^m * x}{f_s}}{2^m}\right\rfloor = \left(\frac{2^m * x}{f_s}\right) \gg m = \left(\frac{2^m}{f_s} * x\right) \gg m \quad (5)$$

При существовании некого выражения $\lfloor func_{f_s}\rfloor$, удовлетворяющего теорему 1, докажем то, что существует выражение:

$$q = \left\lfloor\frac{x}{f_s}\right\rfloor = \lfloor func_{f_s}\rfloor * x \gg m \quad (6)$$

Другими словами, эта задача заключается в нахождении m и $\lfloor func_{f_s}\rfloor$, удовлетворяющих формулу (6). Как правило, для значения нижней грани целочисленного деления предложены следующие формулы:

$$\left\lfloor\frac{x}{f_s}\right\rfloor \leq \frac{x}{f_s} < \left\lfloor\frac{x}{f_s}\right\rfloor + 1 \quad (7)$$

$$\left\lfloor\frac{2^m}{f_s}\right\rfloor \leq \frac{2^m}{f_s} < \left\lfloor\frac{2^m}{f_s}\right\rfloor + 1 \quad (8)$$

$$\left\lfloor\frac{2^m}{f_s}\right\rfloor \leq \frac{2^m}{f_s} \leq \left\lfloor\frac{2^m - 1}{f_s}\right\rfloor + 1 \quad (9)$$

$$\left\lfloor\frac{2^{\mathrm{m}}}{f_s}\right\rfloor * x \gg m \leq \frac{2^{\mathrm{m}}}{f_s} * x \gg m \leq \left\lfloor\frac{2^{\mathrm{m}-1}}{f_s} + 1\right\rfloor * x \gg m \quad (10)$$

Из выражений (5) и (6) выражение (10) изменяется:

$$q = \left\lfloor\frac{x}{f_s}\right\rfloor = \left(\frac{2^m}{f_s} * x\right) \gg m = \lfloor func_{f_s}\rfloor * x \gg m \leq \left\lfloor\frac{2^{m-1}}{f_s} + 1\right\rfloor * x \gg m \quad (11)$$

Из выражения (11) найдём m, удовлетворяющее следующее выражение (12):

$$\left\lfloor \frac{2^m-1}{f_s} + 1 \right\rfloor * x \gg m \le \left\lfloor \frac{2^m}{f_s} + 1 \right\rfloor * x \gg m \ \le \left\lfloor \frac{\left(\frac{2^m}{f_s}+1\right)*x}{2^m} \right\rfloor < \left\lfloor \frac{x}{f_s} \right\rfloor + 1 \quad (12)$$

$$\left\lfloor \frac{(\frac{2^m}{f_s}+1)*x}{2^m} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{x}{f_s} + \frac{x}{2^m} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{x}{f_s} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{x}{f_s} - \left\lfloor \frac{x}{f_s} \right\rfloor + \frac{x}{2^m} \right\rfloor \quad (13)$$

Если в выражении (13) используем $\left(\frac{x}{f_s}\right) = \frac{x}{f_s} - \left\lfloor \frac{x}{f_s} \right\rfloor$, (это означает дробная часть)

$$\left\lfloor \frac{x}{f_s} \right\rfloor + \left\lfloor \left(\frac{x}{f_s}\right) + \frac{x}{2^m} \right\rfloor < \left\lfloor \frac{x}{f_s} \right\rfloor + 1 \quad (14)$$

В общем дробная часть выражается следующим видом:

$$\left(\frac{x}{f_s}\right) \le \frac{(f_s-1)}{f_s} = 1 - \frac{1}{f_s} \quad (15)$$

Если сочетать выражение (14) с выражением (15), то это должно удовлетворить следующее выражение:

$$\left\lfloor \left(\frac{x}{f_s}\right) + \frac{x}{2^m} \right\rfloor \le \left\lfloor 1 - \frac{1}{f_s} + \frac{x}{2^m} \right\rfloor < 1 \quad (16)$$

Из этого получится $\frac{1}{f_s} > \frac{x}{2^m}$. Если количество битов f_s равно k+1, а максимальное количество битов для x равно 32, т.е. если $2^k \le f_s < 2^{k+1}$ и $2^{31} \le x < 2^{32}$, то

$$2^m > (2^{32} - 1) * 2^{\log_2 f_s} \quad (17)$$
$$m \ \ge \ 32 + \log_2 f_s$$

Следовательно, формируется выражение (14) в отношении m, формирующего выражение (17), а из выражения (14) формируется выражение (12), в результате чего можно вычислить $\lfloor func_{f_s} \rfloor$, из которого формируется выражение (12).

Из выражений (9), (10) и (11) можно получить

$$\lfloor func_{f_s} \rfloor = \left\lfloor \frac{2^m-1}{f_s} \right\rfloor + 1 \quad (18)$$

Чтобы ускорить вычисление в диапазонной асимметричной системе счисления с помощью доказанной теоремы 1, проведем процесс изменения выражений:

Если используем выражения (6) и (18), то $q = \left(\left\lfloor \frac{2^m-1}{f_s} \right\rfloor + 1\right) * x \gg m$ (19)

Если сочетать выражения (4) и (19), то можно получить необходимые для вычисления формулы:

$$Q(f_s) = \left\lfloor \frac{2^m-1}{f_s} + 1 \right\rfloor * (M - f) \quad (20)$$

$$C(x, s) = Q(f_s) * x \gg m + b_s + x \quad (21)$$

Следовательно, если дана частота появления множества неких символов, то из формулы (20) можно вычислить $Q(f_s)$, что позволяет заранее вычислить ряд целых чисел $Q(f_s)$ по множеству символов и проводить кодирование с помощью формулы (21). Чтобы более увеличить скорость вычисления в верхней формуле, выражают M в виде степени числа 2.

В результате проведения эксперимента в компьютере с мощностью CoreI5/2.5GHz/Ram4GB показано то, что скорость вычисления для данных с величиной множества символов 256 и размерами ряда входных символов от 10 МБ до 100 МБ, увеличилась в среднем в 1,3 раза при использовании формул (20) и (21), чем при использовании формулы (1).

Предложение. При использовании операций целочисленного умножения и сдвига битов вместо операции целочисленного деления можно увеличить скорость кодирования диапазонной асимметричной системы счисления по теореме 1.

1. Jarek Duda, Asymmetric numeral systems, arXiv:0902.0271. vol5, cs.IT, 2009, pp.47
2. Волков Леонид Сергеевич, Шокуров Антон Вячеславович. JPEG-изображений с применением асимметричных систем счисления. // Тезисы конференции “Ломоносов — 2022”. 2022. С.1-2
3. Дж. Дуда, К. Тахбуб, Н. Дж. Гадил, Э. Дж. Делп. Использование асимметричных систем счисления в качестве точной замены кодирования Хаффмана. // Симпозиум по кодированию изображений, 2015.
4. J. Duda and M. Niemiec, Lightweight compression with encryption based on Asymmetric Numeral Systems, arXiv:1612.04662 [cs.IT], vol1, 2016, pp.1-10.

МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ ДВУХУРОВНЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ*

О. В. Хамисов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
khamisov@isem.irk.ru

Рассматривается задача двухуровневого программирования в оптимистической постановке [1]:

$$F(x,y) \to \min_{x,y}, \quad (1)$$

$$G(x,y) \le 0, x \in X \subset R^n, \quad (2)$$

$$f(x,y) - \varphi(x) \le 0, \quad (3)$$

$$y \in Y \subset R^m, \quad (4)$$

где φ – функция оптимального значения задачи нижнего уровня,

$$\varphi(x) = \min_v \{f(x,v): v \in Y\}, \quad (5)$$

функции $F: R^n \times R^m \to R$, $G: R^n \times R^m \to R$, $f: R^n \times R^m \to R$ дважды непрерывно дифференцируемы, X, Y – выпуклые компактные множества.

Основная трудность решения задачи (1)-(5) связана с неявным заданием функции φ. Для преодоления этой трудности предлагается использовать понятие нелинейной опорной функции [2]. Пусть $\tilde{x} \in X$ – некоторый заданный вектор, $\tilde{y}$ – соответствующее решение задачи (5),

$$\tilde{y} \in \operatorname{Argmin}\{f(\tilde{x},v): v \in Y\}.$$

Тогда

$$v(\tilde{x}) = f(\tilde{x},\tilde{y}),$$

и

$$v(x) \le f(x,\tilde{y}) \ \ \forall x \in X.$$

Множество, задаваемое явным ограничением

$$f(x,y) - f(x,\tilde{y}) \le 0, \quad (6)$$

содержит множество, задаваемое неявным ограничением (5). В докладе предлагается методика аппроксимации задачи (1)-(5) последовательностью задачи вида (1). (2). (4), (5), (6). Обосновывается корректность такой аппроксимации в том смысле, что решения последовательности аппроксимирующих задач сходятся к решению исходной задачи. В основе этой методики лежит технология внешней аппроксимации задач глобальной оптимизации [2], использующая методы ветвей и границ, ветвей и отсечений [3]. Приводятся результаты численных экспериментов.

1. Dempe S. Foundations of bilevel programming. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
2. Хамисов О.В. Невыпуклая оптимизация с нелинейными опорными функциями // Труды ИММ УрО РАН. 2013. Т. 19. №2. С. 295-306.
3. Horst R., Tuy H. Global optimization. Deterministic approaches. Springer-Verlag: Third revised and enlarged edition, 1996.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-41-03004.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ АСИМПТОТИК ВЫЖИВАЕМОСТИ ЧАСТИЦ ПРИ ДИФФУЗИИ ВО ФРАКТАЛЬНОЙ И ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТЯХ

А. В. Ханхаев, В. Е. Архинчеев, Б. В. Хабитуев, С. П. Мальцев, Д. Ф. Дерюгин
Бурятский государственный университет им. Доржи Банзарова
andrham2004@yandex.ru

Аннотация

В работе методом компьютерного моделирования исследуется диффузия частиц в двумерных областях различной геометрии: фрактальной (на основе кривой Коха) и прямоугольной. Цель работы – сравнение долговременных асимптотик вероятности выживания частиц в зависимости от концентрации ловушек. Показано, что геометрия фрактала снижает эффективность захвата частиц, что приводит к увеличению доли активных частиц и изменению динамики их выживания. Установлено, что зависимость времени жизни ансамбля частиц от числа ловушек в обоих случаях наилучшим образом аппроксимируется гиперболической функцией.

1. Введение

Диффузия в нерегулярных и фрактальных средах представляет значительный интерес для моделирования процессов в пористых материалах, биологических системах и наноструктурах. В данной работе проводится сравнительный анализ поведения диффундирующих частиц во фрактальной области (построенной на основе кривой Коха) и в эквивалентной по размерам прямоугольной области с целью выявления влияния геометрии на процессы захвата частиц ловушками.

2. Методы и модель

2.1. Геометрия областей

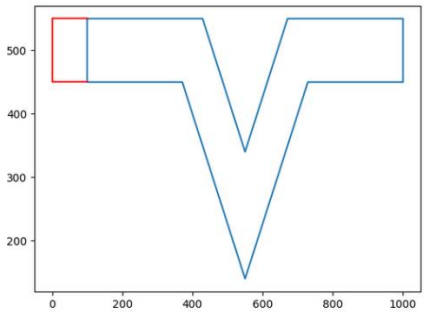


Рисунок 1. Двумерный фрактал

Область № 1: двумерный фрактал на основе кривой Коха (длина = 900, высота = 100). Ловушки размещены случайно на границах. Слева добавлена буферная зона.

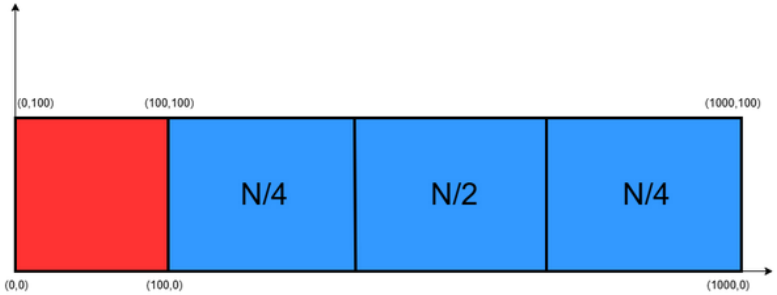


Рисунок 2. Область № 2

Область № 2: прямоугольная область (900×100), разделённая на три зоны. Ловушки распределены в заданной пропорции.

2.2. Алгоритм моделирования

• Использован дискретный алгоритм диффузии с шагом 1.

• Направление движения задаётся генератором псевдослучайных чисел «Вихрь Мерсенна».

• Условия:

- Частица перемещается, если целевая ячейка свободна.
- На границах происходит отражение.

• Параметры запусков:

- Концентрация ловушек: $700 \leq M \leq 2200$, шаг $\Delta M = 20$.
- Для каждой концентрации — 20 независимых запусков по 3 млн итераций.
- Начальное число частиц: 1000.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Количество активных частиц

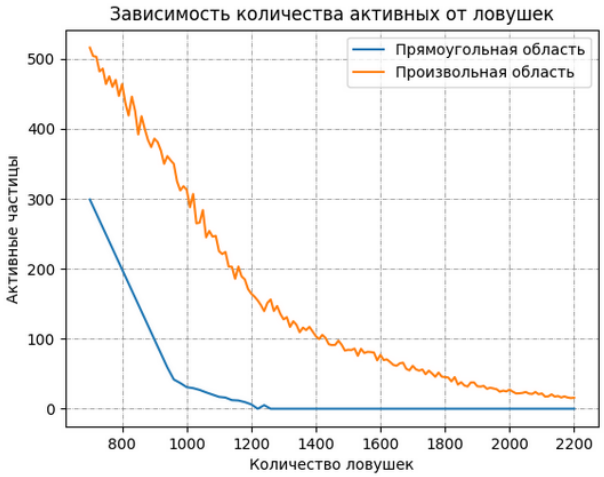


Рисунок 3. Зависимость количества активных частиц от количества ловушек

С ростом числа ловушек количество активных частиц уменьшается в обеих областях. Однако во фрактальной области доля активных частиц остаётся выше благодаря сложной геометрии, затрудняющей захват. В прямоугольной области при $M > 1250$ все частицы захватываются.

3.2. Время жизни системы

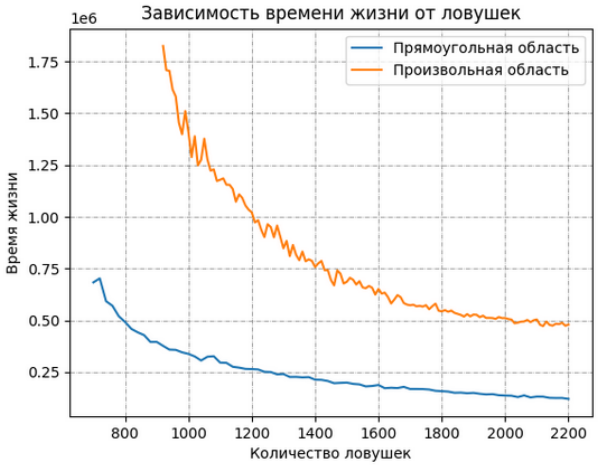


Рисунок 4. Зависимость среднего времени жизни от количества ловушек

Время жизни системы определяется как момент поглощения 631 частицы. Во фрактальной области время жизни впервые достигается при M = 920, тогда как в прямоугольной области — на всех исследованных конфигурациях.

3.3. Аппроксимация зависимости времени жизни

Таблица 1 – Результаты аппроксимации времени жизни

Аппроксимирующая функция	Фрактал	Прямоугольная область
ae^x+b	-	-
$a/x+b$	7.484%	8,004
ax^2+b	-	-
$aln(x) + b$	11.134%	13,897
ae^x+bx^2	-	-
$ax^2+bx + c$	4.919%	9,45
$ax+b$	14.649%	18,861
$a/sqrt(x)+b$	9.327%	11,073
a/x^b	-	18,861

Проведена нелинейная аппроксимация зависимости времени жизни от числа ловушек. Наилучшее соответствие для обеих областей достигается при использовании гиперболической функции a/x + b:

• Средняя ошибка аппроксимации:

- Фрактальная область: 7,484%
- Прямоугольная область: 8,004%

Это свидетельствует об универсальном характере зависимости, несмотря на различие в геометрии.

4. Заключение

1. Геометрия фрактальной области снижает эффективность захвата частиц по сравнению с прямоугольной областью.

2. Зависимость времени жизни ансамбля частиц от числа ловушек в обоих случаях хорошо описывается гиперболической функцией.

3. Полученные результаты согласуются с теоретическими предсказаниями и подтверждают влияние геометрии на кинетику диффузионно-контролируемых процессов.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧНОСТЬЮ НА ЧИСЛАХ С ПЛАВАЮЩЕЙ ЗАПЯТОЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ТРИАНГУЛЯЦИЙ ДЕЛОНЕ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ

А. Е. Хмельнов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
hmelnov@icc.ru

Программная библиотека для создания и анализа триангуляций Делоне, разработанная автором, давно и активно используется в различных задачах обработки пространственных данных. Библиотека основана на алгоритме динамического кэширования [1] и «робастных предикатах» «против часовой» и «в круге» из [2], позволяющих безошибочно охарактеризовать взаимное расположение трёх («против часовой») или четырёх («в круге») точек на плоскости. В реализации этих робастных предикатов используется техника вычислений с произвольной точностью на числах с плавающей запятой из [3]. Долгое время получалось использовать эти готовые алгоритмы, почти как чёрный ящик, лишь немного «заглядывая по капот», чтобы, например, переписать их на другой язык программирования или изменить используемые типы данных.

При построении триангуляции Делоне с ограничениями необходимо учитывать возможность существования пересечения между парами добавляемых жёстких рёбер (рёбер, которые должны быть включены в триангуляцию – тех самых ограничений). При этом приходится находить точки пересечения таких отрезков и включать их в триангуляцию. В силу ограниченной точности чисел с плавающей запятой эти точки пересечений оказываются немного смещены от их истинного положения, в результате чего жёсткие рёбра немного «ломаются» в точке пересечения. В некоторых случаях, например, когда в триангуляцию необходимо включить несколько очень близко расположенных, но не совпадающих, жёстких рёбер (которые, например, обязательно появляются при вычислении в ГИС пересечений между площадными объектами), такие изломы могут приводить к тому, что отрезки ребра, которое не пересекалось с близкими соседями, начинают с ними пересекаться. В таких ситуациях алгоритм добавления жёсткого ребра легко может зациклиться, постоянно пытаясь добавить всё новые рёбра, поэтому приходится специально бороться с таким зацикливанием.

Основной приём, используемый для этого в нашей библиотеке, состоит в том, чтобы прекратить добавление новых точек при увеличении глубины рекурсии – вместо этого точка пересечения переносится в ближайший конец одного из отрезков. Здесь мы считаем, что пересечение, которого изначально не было, появилось при очень небольшом сдвиге, поэтому оно не должно далеко уйти от конца отрезка. Этот приём долго позволял обрабатывать большие объёмы настоящих (не синтетических) пространственных данных, содержащих десятки миллионов точек. Однако проблемы появились при обработке нескольких десятков контуров береговых линий Иркутского водохранилища, полученных со спутниковых изображений, после того, как они все были обрезаны по одному и тому же контуру, проходящему вокруг водохранилища (чтобы исключить из рассмотрения Байкал). В результате появилось несколько десятков почти совпадающих отрезков, при работе с которыми проявились недоработки алгоритма.

Для сокращения числа вторичных пересечений алгоритм добавления фрагментов рёбер в триангуляцию пришлось усложнить. Кроме того, возникли вопросы к используемому алгоритму поиска точки пересечения двух отрезков: всегда ли он даёт максимальную точность? Действительно, если эту точность получится повысить в наиболее сложных случаях, то фрагменты рёбер будут меньше уходить от своего исходного положения, что может снизить частоту появления новых пересечений.

Алгоритм поиска точки пересечения двух отрезков *(A,B)* и *(C,D)* даёт координаты в виде чисел с плавающей запятой, которые относятся к регулярной сетке из точек с такими координатами. Алгоритм даёт максимально возможную точность, если полученная им точка $P' = P^*$ - ближайшей из точек этой сетки к истинной точке.

Чтобы проверить этот факт можно рассмотреть 4-окрестность P' на сетке точек с плавающими координатами и воспользоваться предикатом «против часовой» *ccw*. На самом деле, этот «робастный предикат» является не просто предикатом, поскольку он даёт не логическое значение, а числовую оценку с точным знаком удвоенной знаковой площади треугольника, построенного на трёх точках. Поэтому $|ccw(A,B,P^*)|$ оказывается не больше, чем аналогичные значения у соседних точек сеткихотя бы по одной из координат и то же самое выполняется для $|ccw(C,D,P^*)|$, т.к. расстояние до обеих прямых для P^* не может одновременно уменьшаться при перемещении в соседние точки сетки.

Существуют различные подходы к поиску максимально точного приближения в плавающих координатах к истинной точке пересечения, например, с использованием интервальных, итерационных вычислений, арифметики с повышенной точностью. Все они являются достаточно трудоёмкими. Для решения этой задачи в рассматриваемой библиотеке была применена техника вычислений с произвольной точностью на числах с плавающей запятой.

На вышеупомянутых данных по Иркутскому водохранилищу было получено 1189675 пересечений отрезков, из которых вычисления с произвольной точностью позволили уточнить 2514 точек при работе в 32-разрядном режиме и 3127 точек - в 64-разрядном режиме. Разница между 32- и 64-разрядным режимами объясняется тем, что под Windows в 32-разрядном режиме вычисления с плавающей точкой выполняются сопроцессором с 80-битными регистрами, а в 64-разрядном режиме используются 64-битные значения в регистрах XMM, т.е. в 64-битных программах вычисления выполняются с меньшей точностью. Интересно, что, вопреки ожиданиям, общее число точек в полученной триангуляции при использовании точных пересечений на рассматриваемых данных выросло на несколько сотен.

1. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Издательство Томского государственного университета; 2002: 128.
2. Shewchuk, J. Adaptive Precision Floating-Point Arithmetic and Fast Robust Geometric Predicates. // Discrete and Computational Geometry, 1996 doi: 18.10.1007/PL00009321.
3. Priest, D. M., Algorithms for arbitrary precision floating point arithmetic // Proceedings 10th IEEE Symposium on Computer Arithmetic, Grenoble, France, 1991, pp. 132-143, doi: 10.1109/ARITH.1991.145549.

КАСКАДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УПРАВЛЕНИЯ IMC-PID И ДИСКРЕТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ СКОЛЬЖЕНИЯ, СОЧЕТАЮЩИХ СТРУКТУРУ PFC

Хон Гван Хёк, Ким Су Ен
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
hgh9111@star-co.net.kp

В этой статье мы разработали эффективную каскадную систему управления для процесса с временной задержкой. Предлагаемая каскадная система управления показана на Рис. 1.

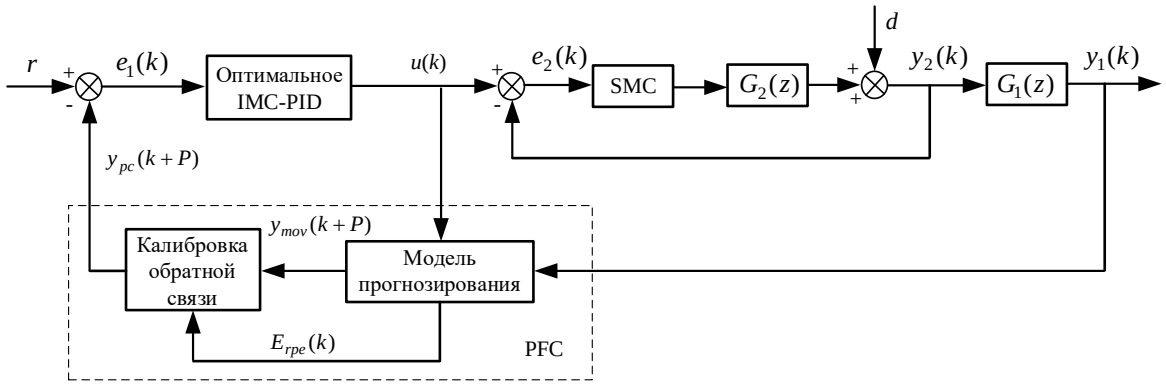


Рисунок 1. Каскадная система управления.

Пусть функция передачи внешней петли – это модель FOPDT следующим образом.

$$G_1 = \frac{K_1 e^{-\tau_1 s}}{T_1 s + 1} \tag{1}$$

Затем параметр контроллера IMC-PID, контроллер внешнего цикла, является следующим.

$$K_p = \frac{T_1 + 0.5\tau_1}{K_1(\lambda + 0.5\tau_1)},\ T_i = T_1 + 0.5\tau_1,\ T_d = \frac{T_1\tau_1}{2T_1 + \tau_1} \tag{2}$$

Здесь, основной параметр λ, оптимизирован с использованием алгоритма оптимизации частиц (PSO), так что индекс IAE минимизирован и максимальная чувствительность (обычно 1.2-2) удовлетворена.

В этом дизайне контроллера структура PFC не участвует в контроле, но только играет роль прогнозирования выхода. Модель прогнозирования также представлена моделью FOPDT. Прогнозирующий выход в структуре PFC можно записать следующим образо.

$$y_{pc}(k+P) = y_{mov}(k+P) + E_{rpe}(k) \tag{3}$$

Здесь $y_{mov}(k+P)$ представляет собой выход модели, $E_{rpe}(k)$ представляет собой ошибку прогнозирования.

С другой стороны, пусть функция передачи внутреннего цикла является моделью FOPDT. Дискретный закон управления SMC может быть получен следующим образом.

$$u_2(k) = (\frac{y_2(k)}{T_2} + \lambda_2 e_2(k))\frac{T_2}{K_2} + \frac{S(k)}{|S(k)+|\beta} = \left[\frac{y_2(k)}{K_2} + \lambda_2 e_2(k)\frac{T_2}{K_2}\right] + \frac{S(k)}{|S(k)|+\beta} \quad (4)$$

Здесь скользящая поверхность $S(k)$ - $S(k) = e_2(k) + \lambda_2 e_2(k) T_s$, T_s - время выборки.

Мы анализируем эффективность предлагаемого метода для следующих процесс.

$$G_1(s) = \frac{1}{300s+1} e^{-270s}, \quad G_2(s) = \frac{1.5}{30s+1} \quad (5)$$

Оптимальное значение λ - $0.96\tau_1$.

Затем мы выполняем симуляцию с изменением параметров SMC следующим образом. Случай 1; $\lambda_2 = 0.03$, $\beta = 0.1$, Случай 2; $\lambda_2 = 0.1$, $\beta = 0.1$, Случай 3; $\lambda_2 = 0.1$, $\beta = 0.5$, Случай 4; $\lambda_2 = 0.5$, $\beta = 0.5$, Случай 5; Случай, когда в случае 4 не сочетается структура PFC.

Результаты моделирования показаны на Рис. 2.

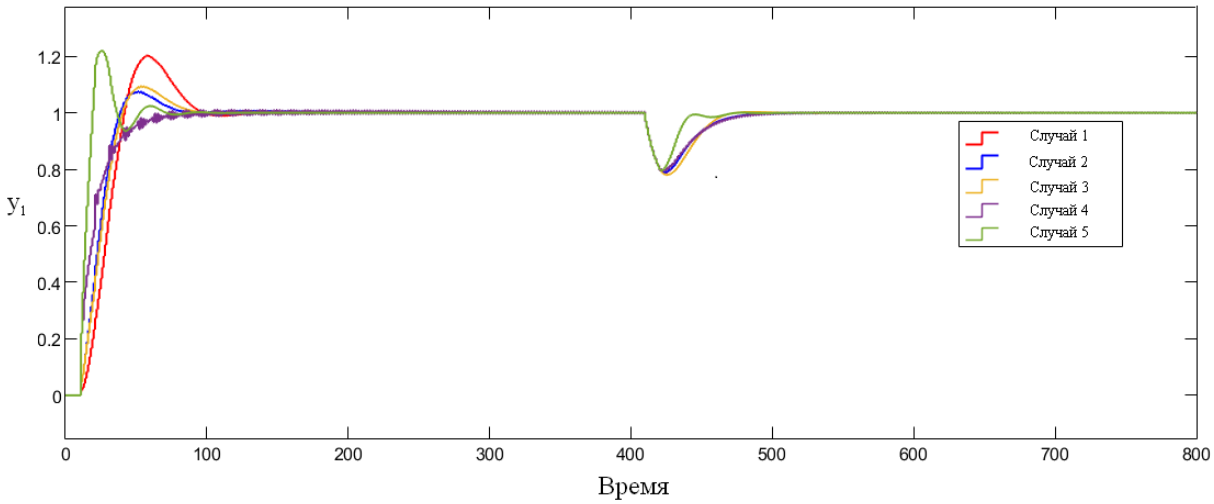


Рисунок 2. Кривая ответа системы закрытого петля.

1. Wang Y.Z., Jin Q.B., Zhang R.D. Improved fuzzy PID controller design using predictive functional control structure // ISA Transactions. 2017. 71. 354-363.
2. Sahaj Saxena, Yogesh V. Hote. Internal Model Control Based PID Tuning Using First-Order Filter. International Journal of Control // Automation and Systems. 2017. 15(1). 149-159.

ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ К УПРАВЛЕНИЮ ВМЕСТИМОСТЬЮ КОНТЕЙНЕРНОГО СКЛАДА*

Г. Ш. Цициашвили [1], А. Н. Гаврилов [2], М. А. Осипова [1]
[1]ИПМ ДВО РАН,
[2]МГУ имени Адм. Невельского

Введение. При рассмотрении сетей массового обслуживания, моделирующих работу контейнерных терминалов в морских портах, большой интерес представляют вопросы функционирования тыловых складов, куда поступают контейнеры с причального фронта для последующей отправки на сухопутные грузовые фронты, а также контейнеры, следующие в обратном направлении [1]. Данная задача в терминах теории массового обслуживания может рассматриваться, как сеть массового обслуживания, на вход которой поступают два потока заявок [2, 3]. В предположении независимости процессов обслуживания потоков эту задачу можно свести к рассмотрению системы массового обслуживания с одним потоком заявок.

Во многих морских портах одним из основных факторов, тормозящих освоение растущего грузопотока, является ограничение по максимальной вместимости складов. Примером может служить порт Владивосток, окруженный со всех сторон городской застройкой и лишенный возможности развития за счет присоединения соседних территорий. Поэтому важной практической задачей является возможность регулирования числа контейнеров, одновременно находящих на складе, или, в терминах теории массового обслуживания, среднего числа заявок в системе.

Особенностью рассматриваемой в статье задачи является введение в модель зависимости интенсивности обслуживания от числа заявок. Предполагается, что при небольшом числе заявок интенсивность обслуживания равна интенсивности входного потока, а при превышении числом заявок некоторой достаточно большой величины интенсивность обслуживания увеличивается. В настоящей работе результатом такого увеличения интенсивности обслуживания является существенное уменьшение среднего числа заявок в системе. Причем этот эффект может быть получен даже при небольшом увеличении интенсивности обслуживания. Такое свойство системы массового обслуживания можно воспринимать, как наличие нелинейного эффекта [4]. Исследование этого эффекта в работе проведено как аналитическими методами, так и с помощью вычислительного эксперимента.

1. Аналитическое и численное исследование

Рассмотрим одноканальную систему массового обслуживания (СМО) с интенсивностью входного пуассоновского потока и λ числом заявок в этой системе n. Предположим, что интенсивность обслуживания $\mu(n)$ имеет вид

$$\mu(n) = \lambda, n \in N_1, \qquad \mu(n) = k\lambda, n \in N_2,$$

$$N_1 = \{0,1,2,\dots,K-1\}, \qquad N_2 = \{K, K+1, \dots, (T+1)K\}.$$

$k, T \in R,\ K, KT \in N, k \geq 1, T > 0$. Для отношения среднего числа заявок в этой системе доказано следующее утверждение.

Теорема. Имеет место соотношение

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИПМ ДВО РАН № 075-00459-25-00.

$$\frac{Mn(1)}{Mn(k)} \to T+1, K \to \infty.$$

Приведем результаты вычислительного эксперимента при различных значениях параметров, но фиксированном T = 0,5.

Таблица 1.

K	100	1000	10000
$Mn(1)$	54,9253	504,554	5004,51
$\frac{Mn(1)}{Mn(1,1)}$	1,36549	1,48646	1,49865
$Mn(1,3)$	51,2366	501,174	5001,17
$\frac{Mn(1)}{Mn(1,3)}$	1,4638	1,49649	1,49965
$Mn(1,5)$	50,5294	500,503	5000,5
$\frac{Mn(1)}{Mn(1,5)}$	1,48428	1,49849	1,49985

Результаты вычислительного эксперимента

2. Обсуждение результатов

Полученное выше среднее значение числа заявок в системе при k = 1 соответствует середине интервала $[0;(T+1)K]$, представляющего множество всех заявок $N_1 \cup N_2$. Среднее значение числа заявок в системе при k >1 соответствует середине интервала $[0;K-1]$, представляющего множество заявок N_1 с интенсивностью обслуживания, равной интенсивности входного потока. Таким образом, в данной модели при k >1 размер множества N_2 не оказывает влияния на среднее число заявок в системе, играет роль лишь положение границы между множествами N_1 и N_2.

При k = 1 среднее количество заявок в системе находится в состоянии неустойчивого равновесия. При любом незначительном увеличении параметра k величина $Mn(k)/Mn(1)$ резко уменьшается и принимает устойчивое значение, равное 2/3. Фактически «сваливается» в своего рода «потенциальную яму», которую не может покинуть даже при существенном увеличении параметра k.

Результаты были получены при $K \to \infty$. Для морских портов с большим контейнерооборотом это не является ограничивающим фактором. Так, вместимость контейнерных складов ПАО «Владивостокский морской торговый порт» по состоянию на март 2024 года составляла 27 тыс. TEU, к 2028 году планируется увеличить вместимость склада до 45 тыс. TEU [5].

Заключение. При анализе синергетических эффектов в стохастических моделях обычно используются различные предельные теоремы теории вероятностей и теоремы эргодичности. В настоящей работе теорема эргодичности предполагает существование стационарного распределения в одноканальной системе с ограниченным числом заявок. Этот факт становится основным при исследовании нелинейного эффекта в данной системе, где в качестве большого параметра выбирается максимальное число заявок в ней. Полученные результаты можно распространить на многоканальные системы и сети массового обслуживания.

1. Han D., Cheng X., Chen H., Changshi Xiao Ch., Wen Y., Sui Z. Simulation Modeling for Ships Entering and Leaving Port in Qiongzhou Strait Waters: A Multi-Agent Information Interaction Method. J. Mar. Sci. Eng. 2024. V. 12.(9), 1560.
2. Лемперт А.А., Жарков М.Л., Казаков А.Л., Вн Х.З. Моделирование морского контейнерного терминала с использованием сетей массового обслуживания. Управление большими системами. 2024. Т. 112, 310 – 337 с.
3. Ву Хоанг Занг, Жарков М.Л., Казаков А.Л. Моделирование работы универсального морского порта на основе управляемой сети массового обслуживания. Вестник Томского Государственного Университета: Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. Т. 72, с. 4 – 15.
4. Tsitsiashvili G.Sh. Study of Synergistic Effects in Complex Stochastic Systems. Mathematics. 2021, V. 9(12), 1396.
5. ВМТП планирует к 2028 году увеличить количество кранов до 70 единиц. Электронный ресурс. https://portnews.ru/news/360975/ (дата обращения: 19 сентября 2025 года).

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧПУ(CNC)-НОГО ТОЧЕНОГО ПРОЦЕССА СПЛАВА INCONEL 617 НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА TOPSIS-TAGUCHI

Чан Гван Су, Ли Чан Чхор, Ян Вон Чхор
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
ywch71912@star-co.net.kp

Процесс точения является одним из самых популярных производственных процессов в металлорежущих операциях [1]. Для дальнейшего улучшения характеристики обработки очень важна оптимизация параметров её процесса. Для оптимизации параметров процесса обработки было проведено много исследований с использованием метода Taguchi, метода поверхности ответа, метода принятия решений многократных атрибутов и т. д. [2-6].

Мы выполнили оптимизацию и оценку влияния параметров точеного процесса для одновременного улучшения режущей силы, шероховатости поверхности и износостойкости инструмента с использованием метода оптимизации TOPSIS-Taguchi в ЧПУ (CNC)-ного точении сплава Inconel 617 в условии MQL (минимальной смазки).

Материал для этого исследования является сплавом Inconel 617.

Мы выбрали концентрацию режущей жидкости (концентрация нанофлюидов Al_2O_3 в кокосовом масле) CC (coolant consistency), скорость резания CS (cutting speed) и скорость подачи FR (feed rate) в качестве контролируемых параметров процесса, а другие параметры процесса были постоянными.

В таблице 1 показаны контролируемые параметры процесса и их уровни.

Таблица 1 – Контрольные параметры процесса и их уровень

Уровень	Параметры процесса		
	CC (%)	CS (м/мин)	FR (мм/об)
Первый уровень	0.25	40	0.14
Второй уровень	0.50	70	0.17
Третий уровень	1.00	100	0.20

Мы выбрали режущую силу (cutting force, CF), шероховатость поверхности (surface roughness, SR), износ инструмента (tool wear, TW) в качестве показателей характеристики процесса точения. В этой статье были выбраны три ответа: режущая сила (cutting force, CF), поверхностная шероховатость (surface roughness, SR), износ инструмента (tool wear, TW). Экспериментальный дизайн проводился в соответствии с ортогональной таблицей L_9 (3^4) Taguchi.

В таблице 2 показаны экспериментальные результаты в соответствии с ортогональной таблицей.

Таблица 2 – Экспериментальные результаты в соответствии с ортогональной таблицей

	Параметры процесса			показатель характеристики		
	CC (%)	CS (м/мин)	FR (мм/об)	CF (N)	SR (μm)	TW (μm)
1	0.25	40	0.14	50.7	0.7325	40.5
2	0.25	70	0.17	359.8	0.8399	72.2
3	0.25	100	0.20	219.0	1.3914	331.6
4	0.50	40	0.17	334.2	1.0646	240.5
5	0.50	70	0.20	266.2	0.6613	93.7
6	0.50	100	0.14	245.0	0.7958	247.1
7	1.00	40	0.20	393.0	0.7836	146.5
8	1.00	70	0.14	337.0	0.5208	212.3
9	1.00	100	0.17	294.0	0.9037	258.9

Мы выполнили оптимизацию и оценку влияния параметров процесса точения с использованием метода оптимизации TOPSIS-Taguchi. Метод TOPSIS [6,7] является одним из наиболее широко используемых методов принятия решений многократных атрибутов, которые используются для преобразования трех показателей характеристики CF, SR и TW в единый показатель характеристики. Метод Taguchi[5,7] используется для оптимизации и оценки влияния параметров процесса CC, CS и FRS для показателей универсальных характеристики.

Мы использовали метод TOPSIS для преобразования трех показателей характеристики в один общий показатель характеристики. Здесь весы показателей характеристики были получены с использованием метода энтропийного взвешивания [6] и 0,469, 0,206 и 0,325 соответственно. В таблице 3 показаны общие показатели характеристики и их рейтинги, полученные методом TOPSIS.

Таблица 3 – Значения показателей универсальных характеристик, полученных методом TOPSIS, и их порядока

Экспериментальный номер	Общие показатели характеристики	Общий рейтинг характеристики
1	0.922	1
2	0.426	3
3	0.347	6
4	0.245	9
5	0.544	2
6	0.425	4
7	0.340	7
8	0.370	5
9	0.316	8

В таблице 4 показаны средние значения показателей универсальных характеристик и влияние параметров процесса на них на трех уровнях. На рис. 1 показаны графики средних значений показателей универсальных характеристик на трех уровнях параметров процесса.

Таблица 4 – Средние значения показателей универсальных характеристик и влияние параметров процесса на них на трех уровнях

Уровень	CC	CS	FR
1	0.565	0.502	0.572
2	0.404	0.447	0.329
3	0.342	0.363	0.410
Диапазон	0.223	0.140	0.243
Оценка влияния(%)	36.801	23.051	40.148
Порядок влияния	2	3	1
Оптимальный уровень	1	1	1
Оптимальное значение	0.25	40	0.14

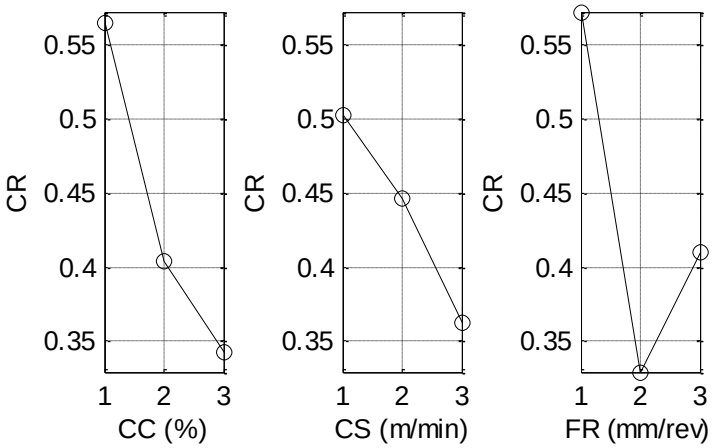


Рисунок 1. Графики средних значений показателей универсальных характеристик на трех уровнях

Из таблицы 4 и рис. 1 можно получить следующие результаты.

Оптимальные уровни параметров процесса для показателей универсальных характеристик составляют 1, 1 и 1 соответственно, поэтому оптимальные значения параметров процесса являются CC = 0,25%, CS = 40 м/мин, FR = 0,14 мм/об соответственно.

Порядок влияния параметров процесса на показателей универсальных характеристик является FR (40,148%), CC (36,801%) и CS (23,051%).

Из этого следует, что FR и CC являются основными параметрами процесса для показателей универсальных характеристик.

Когда CC и CS увеличиваются с уровня 1 до уровня 3, универсальная характеристика уменьшается.

Когда FR увеличивается с уровня 1 до уровня 2, универсальная характеристика резко уменьшается, и когда FR увеличивается с уровня 2 до 3, универсальная характеристика немного увеличивается.

Предложение: Метод оптимизации TOPSIS-Taguchi применим не только для оптимизации процесса ЧПУ(CNC)-ного точения сплава Inconel 617, но и для оптимизации различных материалов и процессов обработки.

1. M. Sarıkaya, and A. Güllü. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. Journal of Cleaner Production 65 (2014) 604–616. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.040
2. I. Asiltürk, and S. Neseli. Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis. Measurement 45 (2012) 785–794. DOI:10.1016/j.measurement.2011.12.004
3. Sarıkaya M, and Güllü A. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. Journal of Cleaner Production 65 (2014) 604–616. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.040
4. S.H. Ryang, W.C. Yang, C.H. Kwon, C.S. Kim, and Y.I. Kim. A methodology for multiple performances optimization of computer numerical controlled (CNC) machining process based on design of experiment, multi-criteria decision-making and multiple regression model. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). (2024) 1–17. https://doi.org/10.1007/s12008-024-01914-y
5. Yang JY, Yang WC, Kim RC, and Jon KH, Comprehensive quality index and map of cast Al alloys according to artificial aging heat treatment conditions using TOPSIS and multiple regression analysis and determination of reasonable heat treatment condition. Journal of Mechanical Engineering Science 2024, 238(5):1441–1452. DOI:10.1177/09544062231185515
6. Yang JY, Om MS, Yang WC, Kim UH, Sok SH, and Ri WS. Process optimization for improving multiple quality attributes of AlSi10Mg alloys manufactured by selective laser melting based on integrated overall quality index. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2025

ВИЗУАЛЬНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ АГЕНТОВ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ МАШИН СОСТОЯНИЙ*

М. А. Чекан
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
chekoopa@mail.ru

Мультиагентное моделирование широко распространено в предметных областях, связаных со сложными распределёнными процессами, в частности в проектировании инфраструктурных и киберфизических систем [1]. Использование машин состояний обеспечивает наглядную и чётко разделимую логику работы агента в вычислительной среде, а использование визуальных средств позволяет облегчить и ускорить разработку, особенно на этапе прототипирования. Доклад представляет инструментарий, предназначенный для генерации агентов на основе парадигмы программирования расширенных иерархических машин состояний (ПРИМС), и являющийся расширенной версией раннее представленной программной надстройки [2] к мультиагентному фреймворку JADE [3] на языке Java.

В рамках расширенной надстройки приложение-генератор формирует цельный класс-поведение на основе диаграммы ПРИМС, либо выполняет «частичную» генерацию каркаса, аналогичного встроенному классу FSMBehaviour. Поведение генерируемого агента описывается в формате Cyberiada-GraphML посредством визуальной среды разработки Lapki IDE с открытым исходным кодом.

Типовые действия агента (отправка/приём сообщений, вызов прикладных модулей) положены в т. н. «компоненты», создаваемые на манер объектов в объектно-ориентированном программировании и обладающие схожими элементами: входными параметрами, сигналами, атрибутами и функциями-действиями. Каждому компоненту соответствует Java-модуль, реализующий работу компонента в поведении агента. Кроме того, надстройка содержит модули, обеспечивающие работу ПРИМС.

Надстройка применяется в программном комплексе для мультиагентного моделирования взаимодействующих микросетей [4]. Использование визуального программирования и ПРИМС обеспечивает более короткий цикл разработки и требует от предметного специалиста меньшей квалификации и трудозатрат. В дальнейшем планируется расширение поддержки ПРИМС, в частности, создания областей, узлов разделения и объединения, описывающих параллельное поведение.

1. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Чекан М.А. Модель поведения агента микросети // Вычислительные технологии. 2023. Т. 28, № 6. С. 108–117.
2. Чекан М.А. Автоматизация разработки мультиагентных систем с использованием иерархических машин состояний // Материалы конференции «Ляпуновские чтения 2024». Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2024. С. 240-241.
3. Bellifemine, F. Jade – A Java Agent Development Framework // Multi-Agent Programming. 2005. Vol. 15. P. 125–147.
4. Чекан М. Методика применения инструментального комплекса для моделирования взаимодействующих микросетей // Материалы VII Междунар. семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2025). Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2025. С. 202–204.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределённых средах» (рег. № 121032400051-9).

СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ РАДИАЦИОННЫХ ЛУЧЕЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ LORA

Чен Г. С., Ри Х. В., Бае В. С., Ан С. Х.
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
jgs8971@star-co.net.kp

В этой статье описывается практическая небольшая беспроводная сетевая конструкция для оценки в реальном времени уровня радиационных лучей в определенных областях. Система обнаружения экологических выбросов в реальном времени с использованием нашей предлагаемой техники LoRa обеспечивает раннюю систему предупреждения для регистрации и обобщения уровня выбросов в окружающей среде с использованием вспышки NaI(Tl), который может обнаруживать частицы излучения в воздушном потоке и оценить риск облучения излучением.

1. Введение. Обнаружение выбросов радиационных лучей окружаюдую средй в определенных областях может привести к стоимости кабеля и сложности, поскольку многие радиометрические устройства могут быть реализованы в сочетании с проводными сетями. Однако технология беспроводной связи может произвольно увеличить количество датчиков, иметь преимущество простого установки, снизить затраты на установку кабеля и повысить надежность экологических измерений. Действительно, как указано в [1], мы планируем полностью внедрять на атомной электростанции четвертого поколения, построенной до 2030 технологию беспроводной связи как режим связи для различных параметров, измерений и измерений первичных и вторичных систем.

Однако некоторые проблемы в реализации систем обнаружения излучения с использованием технологии беспроводной связи.

Во-первых, это влияние пространственной сложности и условий ландшафта.

Объекты и регионы, которые должны быть обнаружены, имеют сложную структуру и топографию зданий, которые должны учитываться в дизайне обнаружения, поскольку они являются большим препятствием для передачи измеренных данных уровня излучения на сервер беспроводной связи [2,3].

Во-вторых, это проблема, которая позволяет беспроводной сети выполнять коммуникацию без атаки снаружи.

В-третьих, гарантия электромагнитной совместимости, в которой все каналы полностью независимы и физически отделены, поэтому канал не должен влиять на другой канал [4].

Мы описываем конфигурацию системы мониторинга окружающей среды в реальном времени с использованием метода LORA и эксплуатации систем обнаружения излучения в конкретных средах и оценить их характеристики.

2. Состав системы.

1) Конфигурация систем обнаружения выбросов окружающей среды с использованием технологии LORA

Схема системы обнаружения выбросов окружающей среды, построенная в формате передачи данных LORA, показана на Рис. 1.

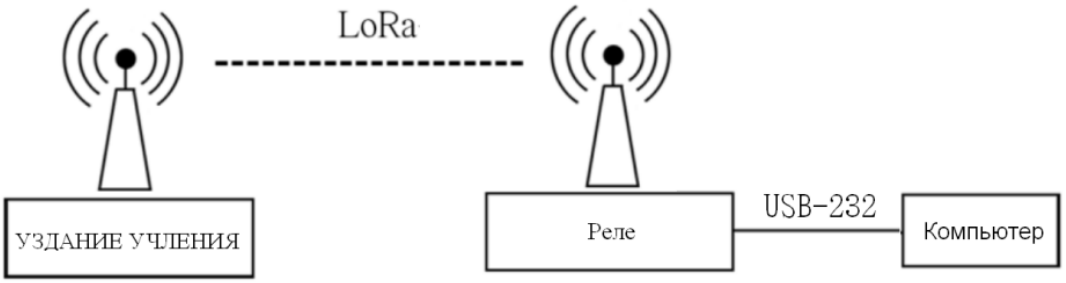


Рисунок 1. Конфигурация систем обнаружения выбросов окружающей среды

Как показано на рисунке.1, система состоит из узлов датчика, реле узлов и компьютера. Передача данных между узлом датчика и реле реализуется с помощью метода связи с частотой диффузии Lora, а датчик датчика отправляет данные в реле после измерения уровня радиации на соответствующей точке установки. Рецептивный узел отправляет полученные данные обратно на компьютер через преобразователь USB-232. Компьютеры контролируют и анализируют данные об экологических излучениях, одновременно отображая и сохраняя их.

2) УЗДАНИЕ УЧЛЕНИЯ

Схема датчика показана на рисунке. 2.

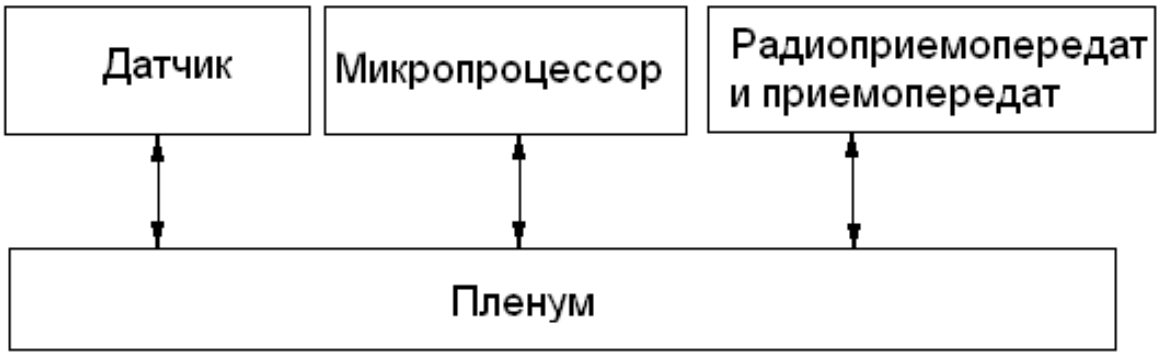


Рисунок 2. Схема датчика датчика

Как показано на рисунке 2, датчик состоял из микропроцессора, датчика копирования, радиоприемопередатчика и источника питания. Процессор использовал 32-битный процессор ARM STM32F103VB серии Cortex-M3. Радиационный датчик использует комбинацию вспышки NaI(Tl) и ФЗУ(ФЗУ-93). Используя этот датчик, доза излучения может быть измерена в диапазоне 0.1 μSv/h до 30 μSv/h. Радиоприемник использует беспроводной модуль LoRa E32-TTL-1W.

3) Реле

Блок-схема реле узла показана на рисунке. 3.

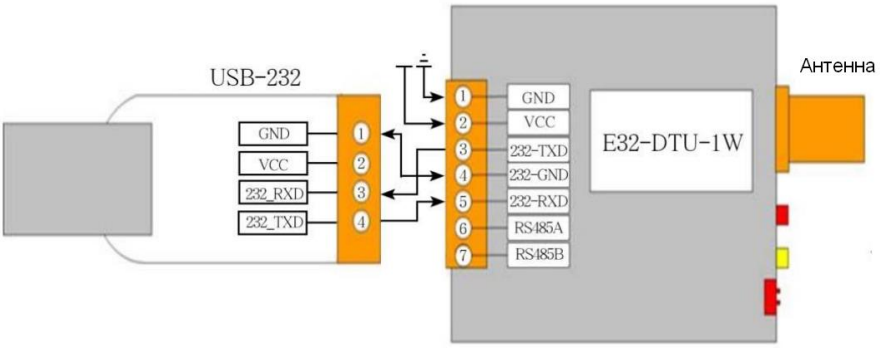


Рисунок 3. Конфигурация реле узла

Рецептивный узел состоит из преобразователей E32-DTU-1W и USB-232, получая передаваемые данные из датчика датчика и выполняет реле компьютера.

3. Оценка процесса. Выполнение предлагаемой системы оценивается через два эксперимента.

Во-первых, мы оцениваем чувствительность датчика к облучению.

Во-вторых, мы оцениваем надежность связи, работающей в системе более чем в определенной области. Позиция должна быть предоставлена для обеспечения чувствительности и диапазона измерения, чтобы измерить дозу, вызванную высоким облучением от уровня излучения.

Калибровка датчика радиатора использует радиометрический аппарат серии IAEA TCS-161 и 28-SA (источник 137CS).Результаты оценивали ниже ± 15%. Второй эксперимент для оценки производительности системы проводился путем оценки скорости потери пакета и скорости ошибок на разных расстояниях передачи в определенной области. Затем датчик датчика был установлен на высоте 1 м от поверхности земли, а узел реле был установлен на втором этаже здания, оснащенного компьютером. Мы устанавливаем расстояние связи на 100, 500, 1000, 400000, 4000 и 6000 м, а затем последовательно обмениваются 100 пакетов данных, результаты сравнения скорости потери пакета и скорости ошибок показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка эффективности системы сбора данных

Номер	Улица(m)	Пакет данных получения	Уровень потери пакета (%)	Процент ошибок (%)
1	100	100	0	0
2	500	100	0	0
3	1 000	100	0	0
4	2 500	100	0	0
5	4 000	100	0	0
6	6 000	72	3.2	8

Из таблицы 1 можно увидеть, что скорость потери пакета на расстоянии 6000 м составляет 3,2%, а скорость ошибок составляет 8%, что может привести к успешной передаче данных на расстоянии передачи в широком диапазоне окружающей среды (менее 4000 м).

4. Заключение. В этой статье описывается новое решение о дизайне беспроводной сети для измерения выбросов окружающей среды. Прототип предлагаемого датчика проводил эксперименты дозы под облучением излучения,

оцениваемым примерно 0.25 ± 0.03uSv/h. Мы также показали, что в диапазоне ниже 4 км в области исследования беспроводные сети имеют 100%-ную приемную ставку, что обеспечивает точность и надежность. Предлагаемая сеть беспроводного датчика обеспечивает в режиме реального времени обнаружения излучения через простую и экономическую конфигурацию в широком диапазоне.

Однако если мы фактически используем предлагаемую сеть беспроводного датчика, мы должны решить другие проблемы, такие как: экстремальные условия окружающей среды, электромагнитные помехи, безопасность сети и т.д.

1. Rania Ibrahim Gomaa, Ihab Adly Shohdy. Real-time Radiological Monitoring of Nuclear Facilities using ZigBee Technology // IEEE Sensors Journal. 2014. V. 14. No. 11. P. 4007.
2. Yuting Wang, Fanhao Zhang, Xiaolong Zheng, Liang Liu, and Huadong. Decoding LoRa Collisions via Parallel Alignment // ACM Transactions on Sensor Networks. 2023.V. 19, No. 3. P. 25.
3. Juha Petajajarvi, Konstantin Mikhaylov. Performance of a low- power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2017, V. 13. No. 3. P. 12-14.
4. Jansen C. Liando, Amalinda Gamage, Agustinus W. Tengourtius, and Mo Li. Known and Unknown Facts of LoRa: Experiences from a Large-scale Measurement Study // ACM Transactions on Sensor Networks. 2019. V. 15. No. 2, P. 35.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАСЫПНОЙ СТРУКТУРЫ ЧАСТИЦ ПОРОШКОВ

Чжэ Рим Сим
Факультет науки и технологии материалов,
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
sjr74816@star-co.net.kp

Насыпная плотность является массой единицы объема свободно насыпанного порошка [1, 2].

Повышение насыпной плотности порошка является важным способом для повышения плотности формирования и плотности спеченного продукта при прессовании порошков, таких как инжекционное формирование порошков (ИФП). Поэтому были проведены исследования процессов смешивания порошков для получения оптимальной насыпной плотности. [1, 3, 4].

Чтобы определить отношение размеров частиц порошков для получения оптимальной насыпной плотности частиц сырьевых порошков ИФП и провели математическое моделирование насыпной структуры, предполагая, что частицы сырьевых порошков имеют сферический вид.

Насыпная структура сферических частиц порошков аналогична моделям объемно — центрированной, гранецентрированной и простой кубических структур. И насыпная структура с наибольшей насыпной плотностью является такой насыпной структурой, как структурная модель атомов гранецентрированной кубической решетки с координационным числом 12.

При насыпании порошка с размерами частиц d_1=1 в правильный куб с длинами ребер *n* со структурной моделью гранецентрированной кубической решетки 4 частицы порошка находятся в единичной модели (рис. 1), а относительная насыпная плотность f_1 вычисляется следующим образом.

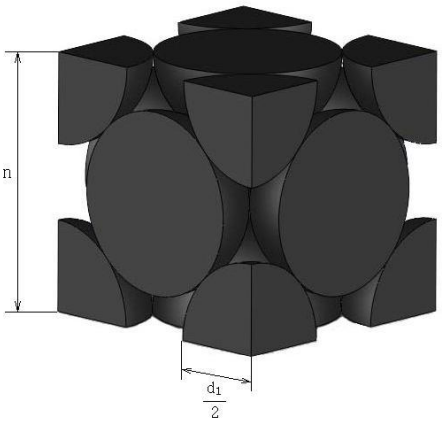


Рисунок 1. Оптимальная насыпная структура сферических частиц порошков с размером d_1

$$f_1 = \frac{V_1}{V_0} = \frac{4 \cdot \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_1}{2}\right)^3}{n^3} = \frac{4 \cdot \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_1}{2}\right)^3}{\left(\sqrt{2}d_1\right)^3} = \frac{\frac{2\pi}{3}d_1^3}{2\sqrt{2}d_1^3} = \frac{2\pi}{6\sqrt{2}} \approx 0.7401 \qquad (1),$$

где V_0 – объем куба, V_i – объем частиц порошка с размером *di*

В насыпной структуре частиц порошков, показанной на рис.1, существуют пространственные структуры двух типов: один тип — пространство (октаэдрическая

трещина), состоящееся из 6 частиц порошков, а другой тип — пространство (тетраэдрическая трещина), состоящееся из 4 частицы порошка.

При этом в единичной модели на рис.1 образуются 4 октаэдрической трещины и 8 тетраэдрических трещин (рис. 2, 3).

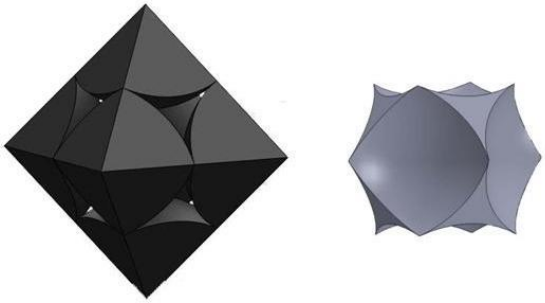


Рисунок 2. Структура октаэдрической трещины

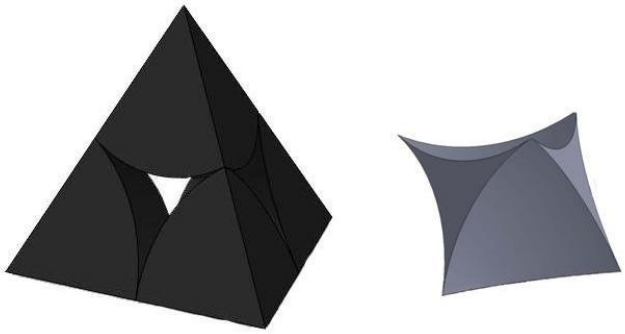


Рисунок 3. Структура тетраэдрической трещины

Если заполнили октаэдрическую трещину частицами порошка с размером d_2 и тетраэдрическую трещину — с размером d_3, то могут увеличить насыпную плотность порошка. При этом относительные насыпные плотности (f_2 и f_3) частиц порошков с размерами d_2 и d_3 вычисляется следующим образом:

$$d_2 = n - d_1 = (\sqrt{2} - 1)d_1 \approx 0.4142\, d_1 \quad (2)$$

$$f_2 = \frac{V_2}{V_0} = \frac{4 \cdot \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_2}{2}\right)^3}{n^3} = \frac{\frac{16}{3}\pi \cdot \frac{(\sqrt{2}-1)^3 \cdot d_1^3}{8}}{\left(\sqrt{2}d_1\right)^3}\sqrt{2}\,\frac{4}{3}\pi\left(\frac{\sqrt{2}-1}{2}\right)^3 \approx 0.0526 \quad (3)$$

$$d_3 = (\sqrt{\frac{3}{2}} - 1) \cdot d_1 \approx 0.2247\, d_1 \quad (4)$$

$$f_3 = \frac{V_3}{V_0} = \frac{8 \cdot \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_3}{2}\right)^3}{n^3} = \frac{\frac{4}{3}\pi \cdot \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1\right)^3 \cdot d_1^3}{\left(\sqrt{2}d_1\right)^3} = \frac{2}{3\sqrt{2}}\pi \cdot \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1\right)^3 \approx 0.0168 \quad (5)$$

Частицы порошков с размером d_2 входят в октаэдрическую трещину и образуют 8 тетраэдрических трещин, а частицы порошков с размером d_3 входят в тетраэдрическую трещину и образуют 4 тетраэдрической трещины.

Таким образом, в единичной модели (рис. 1) существуют 32 тетраэдрической трещины, которые образуются в результате входа частиц порошков с размером d_2 в октаэдрические трещины, и 32 тетраэдрической трещины, которые образуются в

результате входа частиц порошков с размером d_3 в тетраэдрические трещины. Если заполнили эти тетраэдрические трещины частицами порошков с размерами d_4 и d_5, то относительные насыпные плотности (f_4 и f_5) частиц порошков с размерами d_4 и d_5 вычисляется следующим образом:

$$d_4 = \frac{\left(\sqrt{3}-1\right)\cdot\left(\sqrt{2}-1\right)}{1-\sqrt{3}+\sqrt{6}}\cdot d_1 \approx 0.1766\, d_1 \quad (6)$$

$$f_4 = \frac{V_4}{V_0} = \frac{32\cdot\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_4}{2}\right)^3}{n^3} = \frac{32\cdot\frac{4}{3}\pi\cdot\left[\frac{\left(\sqrt{3}-1\right)\cdot\left(\sqrt{2}-1\right)}{2\left(1-\sqrt{3}+\sqrt{6}\right)}\right]^3\cdot d_1^3}{\left(\sqrt{2}d_1\right)^3} = \quad (7)$$

$$= \frac{16}{3}\cdot\sqrt{8}\cdot\pi\cdot\left[\frac{\left(\sqrt{3}-1\right)\cdot\left(\sqrt{2}-1\right)}{2\left(1-\sqrt{3}+\sqrt{6}\right)}\right]^3 \approx 0.0326$$

$$d_5 = \frac{\sqrt{6}-2}{2\cdot\left(\sqrt{6}-1\right)}\cdot d_1 \approx 0.1551\, d_1 \quad (8)$$

$$f_5 = \frac{V_5}{V_0} = \frac{32\cdot\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_5}{2}\right)^3}{n^3} = \frac{32\cdot\frac{4}{3}\pi\cdot\left[\frac{\sqrt{6}-2}{2\cdot\left(\sqrt{6}-1\right)}\right]^3\cdot d_1^3}{\left(\sqrt{2}d_1\right)^3} = \quad (9)$$

$$= \frac{16}{3}\cdot\sqrt{8}\cdot\pi\cdot\left[\frac{\sqrt{6}-2}{2\cdot\left(\sqrt{6}-1\right)}\right]^3 \approx 0.0221$$

Относительная насыпная плотность частиц порошков вышеуказанных пяти видов может быть выражена следующим образом:

$$f_0 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 = 0.7401 + 0.0526 + 0.0168 + 0.0326 + 0.0221 = \quad (10)$$
$$= 0.8642$$

Из математического моделирования насыпной структуры порошков выясняется то, что при смешивании частиц порошков пяти видов с отношением размеров 1 : 0.4142 : 0.2247 : 0.1766 : 0.1551 по отношению 74.01 : 5.26 : 1.68 : 3.26 : 2.21 относительная насыпная плотность равна 0.8642, а также можно узнать, если еще добавляют частицы порошка с отношением размеров не более 0.1551, то можно еще больше увеличить относительную насыпную плотность.

Предложение. Математическое моделирование насыпной структуры частиц порошков можно применить к смешиванию сырьевого порошка для повышения плотности спеченных продуктов с использованием технологии порошковой металлургии.

1. Осокин, Е. Н. Процессы порощковой металлургии. М.: Красноярск ИПК СФУ, 2008.
2. Либенсон Г. А., Лопатин В. Ю., Комарницкий Г. В. Процессы порощковой металлургии. Т. 2. М.: Москва МИСИС, 2002.
3. Kulkarni K M., Metal Powders and feedstocks for metal injection molding // The International of Powder Metallurgy. 2000. № 3. pp. 43–44.
4. Guo Shibo, Qu Xuanhui, He Xinbo, Zhou Ting, Duan Bohua, Powder injection molding of Ti–6Al–4V alloy // Journal of Materials Processing Technology. 2006. № 173. pp.310–314.

РЕГУЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ БЕЗ ДАТЧИКА СКОРОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА БЕЗ АРОМАТА И КОНТРОЛЯ РЕЖИМА СКОЛЬЖЕНИЯ

Чи ЫН Хэ, Со Ган Хо, Сон Чу Кан
Факультет автоматики,
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
hgh9111@star-co.net.kp

Асинхронный двигатель является нелинейным объектом, который сильно влияет нарушения, включая изменение нагрузки и т. д. во время работы.

Мы представляем новый метод дизайна системы регулирования асинхронного двигателя без датчика скорости с использованием фильтра Калмана без аромата и контроля режима скольжения.

1. Алгоритм UKF для оценки состояния асинхронного двигателя (1) Определите начальные значения для переменных состояний и матрицы ковариации.

$$\hat{\boldsymbol{x}}_0 = E[\boldsymbol{x}_0] \quad \boldsymbol{P}_0 = E[(\boldsymbol{x}_0 - \hat{\boldsymbol{x}}_0)(\boldsymbol{x}_0 - \hat{\boldsymbol{x}}_0)^T] \tag{1}$$

(2) Первоначальное время составляет k = 1 и вычисляет 2n + 1 Sigma Point и его весовые значения в соответствии с методом выбора Sigma.

$$\boldsymbol{\chi}_{k-1}^{(0)} = \hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}$$

$$\boldsymbol{\chi}_{k-1}^{(i)} = \hat{x}_{k-1} + (\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_{k-1}})_i \ , \quad i = 1,2,\cdots,n \quad \boldsymbol{\chi}_{k-1}^{(i)} = \hat{\boldsymbol{x}}_{k-1} - (\sqrt{(n+\lambda)\boldsymbol{P}_{k-1}})_{i-n} \ , \quad i = n+1, n+2,\cdots,2n \tag{2}$$

Здесь $(\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}})_i$ - I-й столбец матрицы $\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}}$,λ=(α^2–1)n, а α - параметр настройки.

(3) Мы выполняем нелинейное преобразование $\chi_{k|k-1}^{(i)} = f(\chi_{k-1}^{(i)}, u_{k-1}), i = 0,1,\cdots,2n$ в каждой точке k и вычисляет значения прогнозирования состояния и предсказания ковариации ошибок в соответствующем K-времени.

$$\hat{x}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \chi_{k|k-1}^{(i)} \qquad \boldsymbol{P}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \boldsymbol{w}_i^c [\boldsymbol{\chi}_{k|k-1}^{(i)} - \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}][\boldsymbol{\chi}_{k|k-1}^{(i)} - \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}]^T + \boldsymbol{Q} \tag{3}$$

Здесь w_i рассчитывается следующим уравнением в качестве весового значения, соответствующего точке выборки χ_i.

$$w_0^m = \frac{\lambda}{n+\lambda}, \quad w_0^c = \frac{\lambda}{n+\lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta), \quad w_i^m = w_i^c = \frac{1}{2(n+\lambda)}, \quad i = 1,2,\cdots,2n$$

(4) Для каждой Sigma-точки в наборе образцов выполняется нелинейное преобразование $h(\bullet)$.

$$\zeta_{k|k-1}^{(i)} = h(\boldsymbol{\chi}_{k|k-1}^{(i)}), i = 0,1,\cdots,2n \qquad \hat{\boldsymbol{y}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \boldsymbol{w}_i^m \boldsymbol{\zeta}_{k|k-1}^{(i)} \tag{4}$$

Прогнозирование ковариации и взаимной ковариации для y рассчитывается следующим образом.

$$\boldsymbol{P}_{y,k|k-1} = \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{w}_i^c \left[\boldsymbol{\zeta}_{k|k-1}^{(i)} - \hat{\boldsymbol{y}}_{k|k-1}\right]\left[\boldsymbol{\zeta}_{k|k-1}^{(i)} - \hat{\boldsymbol{y}}_{k|k-1}\right]^T + \boldsymbol{R} \quad \boldsymbol{P}_{xy,k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \boldsymbol{w}_i^c \left[\boldsymbol{\chi}_{k|k-1}^{(i)} - \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}\right]\left[\boldsymbol{\zeta}_{k|k-1}^{(i)} - \hat{\boldsymbol{y}}_{k|k-1}\right]^T \tag{5}$$

Матрица коэффициента усиления фильтра Калмана в k-времени рассчитывается следующим уравнением.

$$\boldsymbol{L}_k = \boldsymbol{P}_{xy,k|k-1} \boldsymbol{P}_{y,k|k-1}^{-1} \tag{6}$$

Мы выполняем обновления для оптимального прогнозирования переменных состояния системы и ковариации матрицы.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + L_k(y_k - \hat{y}_{k|k-1}) \quad P_k = P_{k|k-1} - L_k P_{y,k|k-1} L_k^T \tag{7}$$

2. Контроль режима скольжения

Система регулирования асинхронного двигателя разработана на основе оценки скорости ротора с использованием фильтра Калмана без аромата.(Рис.1)

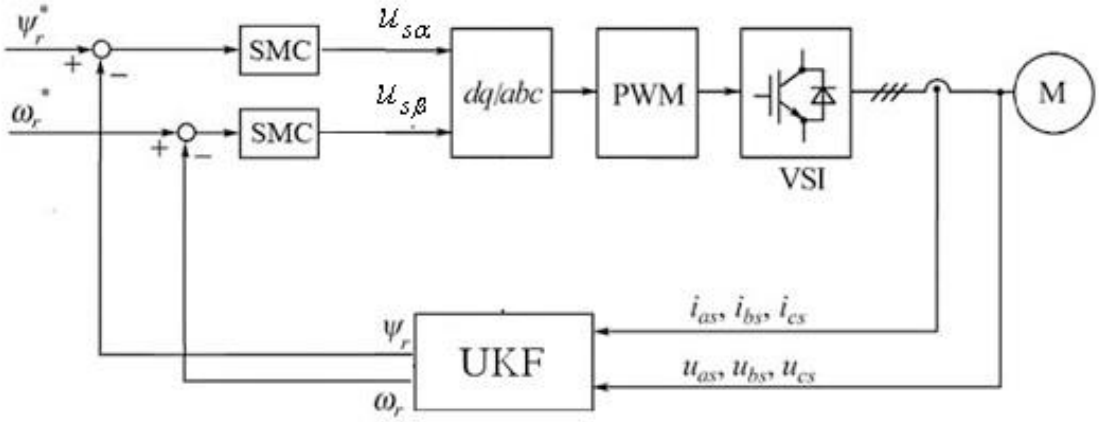


Рисунок 1. Система регулирования асинхронного двигателя без датчика скорости с использованием UKF и контроллера режима скольжения

Сначала мы устанавливаем функцию переключения следующим образом. Здесь k_1 и k_2 являются положительными константами.

$$S_1(\omega_r) = k_1(\omega_r - \omega_{ref}) + (\dot{\omega}_r - \dot{\omega}_{ref})$$
$$S_2(\psi_r) = k_2(\psi_r - \psi_{ref}) + (\dot{\psi}_r - \dot{\psi}_{ref}) \tag{8}$$

Вычисляется дифференциал функции переключения.

$$\dot{S} = f(u) \tag{9}$$

Асимптотическое правило используется в сочетании с асимптотическим правилом равного скорости и асимптотическим правилом скорости мощности.

$$\dot{S} = -(\varepsilon + k|s|^{\alpha})sgn(s) \tag{10}$$

Из уравнений (9) и (10) определяются законы управления.

На Рис.2 и Рис.3 показано, что через Matlab/Simulink алгоритм фильтра без аромата и контроль режима скольжения для оценки и контроля состояния асинхронного двигателя эффективен .

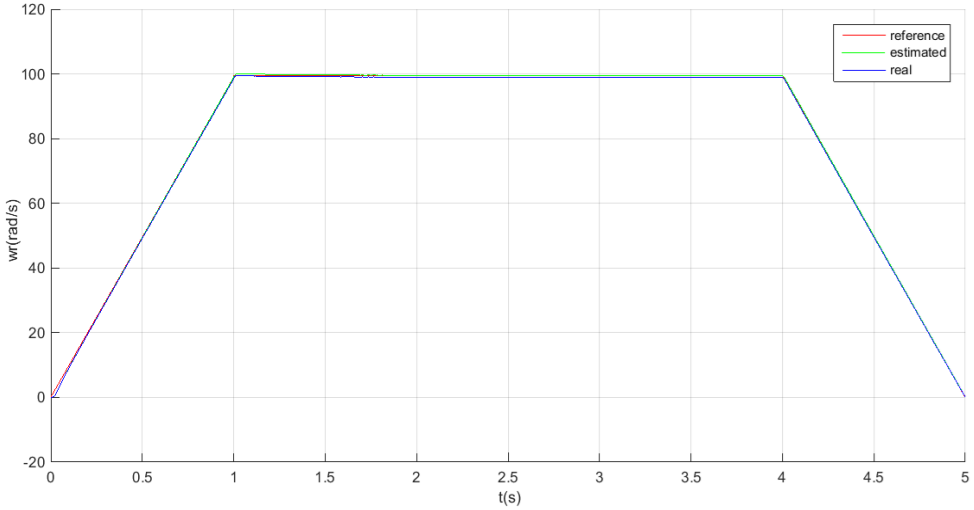


Рисунок 2. Кривая скорости

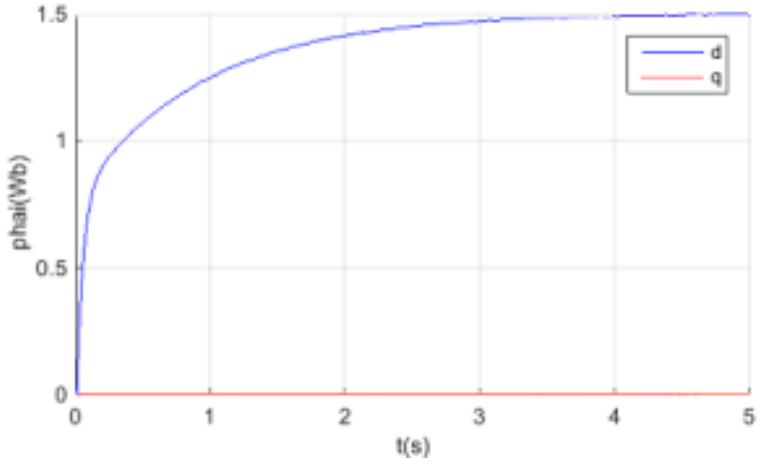


Рисунок 3. Кривая магнитного потока

Предлагаемый метод может применяться при проектировании системы управления, включая наблюдатели состояния в нелинейных объектах.

1. Ammar A., Bourek A., Benakcha A., Sensorless SVM-direct torque control for induction motor drive using sliding mode observers, Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2017. T.28, №2. C. 189–202.
2. Yin Z. G., Li G. Y., Zhang, Y. Q., Liu J., Sun X. D., Zhong Y. R., A speed and flux observer of induction motor based on extended Kalman filter and Markov chain, IEEE Transactions on Power Electronics, 2017. T.32, № 9. C. 7906–7117.
3. Jafarzadeh S., Lascu C., Fadali M. S., State estimation of induction motor drives using the unscented Kalman filter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012. T.59, №11. C. 4207–4216.
4. Jafarzadeh S., Lascu C., Fadali M. S., Square root unscented Kalman filters for state estimation of induction motor drives, IEEE Transactions on Industry Applications, 2013. T.49, №1. C. 92–99.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ДИФФЕРЕНИЦАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

В. Ф. Чистяков, Е. В. Чистякова
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
chist@icc.ru, elena.chistyakova@icc.ru

Рассматривается эволюционная система уравнений в частных производных

$$\Lambda_k(D_t, D_x)u \coloneqq \sum_{j=0}^{k} \mathcal{A}_j(D_x)D_t^j u = f(x,t),\ \ (x,t) \in \mathbf{U} = \mathbf{X} \times T, \qquad (1)$$

где $T = [\alpha, \beta], X = [x_0, x_1], \mathcal{A}_j(D_x) = \sum_{i=0}^{k_j} A_{j,i}(x,t)D_x^i, D_t \equiv \frac{\partial}{\partial t}, D_x \equiv \frac{\partial}{\partial x}; A_{j,i}(x,t)$ – матрицы размерности $(n \times n)$, нулевая степень операторов дифференцирования является единичным оператором, $f(x,t), u \equiv u(x,t)$ – соответственно заданная и искомая вектор-функции. Предполагается что все элементы матриц $A_{j,i}(x,t)$ и компоненты вектор-функции $f(x,t)$ принадлежат пространству вещественно-аналитических функций, обозначаемому как $\mathbf{C}^A(\mathcal{U})$, где $\mathcal{U} \supset \mathbf{U}$.

Под решением системы (1) в области $\mathbf{U}$ мы будем понимать любую вектор-функцию $u(x,t)$, которая имеет непрерывные производные всех требуемых порядков и обращает уравнение (1) в тождество в $\mathbf{U}$.

Предполагается, что для системы уравнений (1), обладают следующим свойством: на любом сужении области $\widetilde{\mathbf{U}} \subset \mathbf{U}$ найдется свободный член $\phi(x,t)$ такой, что система уравнений

$$\mathcal{A}_k(D_x)z = \varphi(x,\bar{t}),\ \ (x,\bar{t}) \in \widetilde{\mathbf{U}}\,. \qquad (2)$$

не имеет решений при любом фиксированном $\bar{t}$. Такие системы принято называть дифференциально – алгебраическими уравнениями ДАУ в частных производных (ДАУЧП). В докладе используются методы исследования ДАУЧП, основанные на применении теории обыкновенных ДАУ [1]. При анализе обыкновенных ДАУ выявлено наличие целочисленной характеристики системы, называемой ее индексом, который определяет порядок производных входных данных, от которых зависит решение ДАУ. В докладе обсуждается понятие индекса для ДАУ в частных производных и способы выбора метода численного решения в зависимости от индекса, в частности, варианта метода наименьших квадратов (МНК).

В простейшем случае система (1), удовлетворяющая условию (2), имеет вид

$$\Lambda_1(D_t, D_x) = A(x,t)D_t u + B(x,t)D_x u + C(t,x)u = f(x,t), \quad (x,t) \in \mathbf{U} \qquad (3)$$

где

$$A(x,t) = A_{1,1}(x,t), \det A(x,t) = 0\ \forall (x,t) \in \mathbf{U},$$
$$B(x,t)D_x + C(x,t) = [A_{0,1}(x,t)D_x + + A_{0,0}(x,t)]D_t^0.$$

Обычно для системы (2) задают начальные и краевые условия вида

$$u(x_0,t) = \phi(t), u(x,\alpha) = \psi(x), \phi(\alpha) = \psi(x_0). \qquad (4)$$

Пример 1. Пусть в области $\mathbf{U}$, где $\alpha > 1$, задана система

$$\Lambda_1(D_t, D_x)u = \begin{pmatrix} a_1 & \mathbf{a} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} D_t u + \begin{pmatrix} b_1 D_x + c_1 & \mathbf{b}D_x + \mathbf{c} \\ 0 & \Lambda_1(D_x) \end{pmatrix} u = f, \qquad (5)$$

где

$$\Lambda_1(D_x) = \begin{pmatrix} e^{xt} & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} D_x + \begin{pmatrix} \gamma(x,t) & 0 \\ e^{xt} & \delta \end{pmatrix},\ f = (f_1 \quad f_2 \quad f_3)^\top, u = (u_1 \quad u_2 \quad u_3)^\top,$$

$\top$ – символ транспонирования,

$\mathbf{a} = (a_2 \quad a_3), \mathbf{b} = (b_2 \quad b_3), \mathbf{c} = (c_2 \quad c_3), \delta, a_i, b_i, c_i, i = 1,2,3,$ – числовые параметры. Кроме того, $\gamma(x,t) \neq 0$, либо $\gamma(x,t) = 0\ \forall (x,t) \in \mathbf{U}$. Характеристический многочлен

$$\Theta(\lambda,\mu) = \det[\lambda A(x,t) + \mu B(x,t) + C(x,t)] = (a_1\lambda + \mu b_1 + c_1)[\mu e^{xt}(\delta - 1) + \delta\gamma(x,t)], \quad (6)$$

где λ, μ – комплексные параметры. В классической теории, когда матрицы $A(x,t), B(x,t)$ невырожденные, корни многочлена $\Theta(\lambda,\mu)$ несут информацию о типе системы и структуре множества решений (см. например, [2]). Для данного примера это не так. Действительно, пусть $\gamma(x,t) \equiv 0, \delta \equiv 1$. Тогда $\Theta(\lambda,\mu) \equiv 0\ \forall (x,t) \in \mathbf{U}\ \forall \lambda, \mu$ и никакой информации о свойствах системы (5) мы не имеем. Подстановкой проверяем, что при $\varrho(x,t) = \gamma(x,t) - te^{xt} \neq 0\ \forall (x,t) \in \mathbf{U}$ существует

$$\Lambda_1^{-1}(D_x) = \frac{1}{\varrho(x,t)}\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & e^{xt} \end{pmatrix} D_x + \frac{1}{\varrho(x,t)}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -e^{xt} & \varrho(x,t) \end{pmatrix}.$$

Тогда $(u_2 \quad u_3)^\top = \Lambda_1^{-1}(D_x)(f_2 \quad f_3)^\top$. Подставим эти компоненты в первое уравнение системы (5). Получим уравнение

$$a_1 D_t u_1 + b_1 D_x u_1 + c_1 u_1 = w(x,t), \quad (7)$$

где $w(x,t) = f_1 - [\mathbf{a}D_t(u_2 \quad u_3)^\top + \mathbf{b}D_x(u_2 \quad u_3)^\top + \mathbf{c}(u_2 \quad u_3)^\top]$, которое имеет семейство решений типа бегущей волны. Таким образом, система (5) разрешима при любой f. Решение задачи (5), (4) существует и единственно тогда и только тогда, когда в условиях (4) учтено, что компоненты решения $(u_2 \quad u_3)^\top$ определены единственным образом. Если $\gamma(x,t) = te^{xt}, \delta = 1$, то $\Theta(\lambda,\mu) \not\equiv 0$. Система (5) разрешима не при любой f: необходимо, чтобы $f_2 = D_x f_3$. В качестве u_3 можно взять произвольную функцию и задача(5), (4) имеет бесконечное число решений.

Введем в области $\mathbf{U}$ сетку

$$\mathbf{U}_{h,r} = \{(x_i, t_j): x_i = x_0 + ih, t_j = t_0 + j\tau, i = 0,1,2,\dots,N_1, j = 0,1,2,\dots,N_2\}, \quad (8)$$

где $\kappa = \frac{\tau}{h} = const$, и рассмотрим неявную трехточечную схему

$$A(x_i,t_j)\frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{\tau} + B(x_i,t_j)\frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{\tau} + C(x_i,t_j)u_{i,j} = f(x_i,t_j) \quad (9)$$

где $u_{i,0} = u(x_i,0) = \phi_i, u_{0,j} = u(0,t_j) = \psi_j$. Расчетная схема имеет вид

$$\mathcal{S}_{i,j}u_{i,j} = \left[\frac{A(x_i,t_j)}{\tau} + \frac{B(x_i,t_j)}{h} + C(x_i,t_j)\right]u_{i,j} = f(x_i,t_j) + \frac{A(x_i,t_j)u_{i,j-1}}{\tau} + \frac{B(x_i,t_j)}{h}.$$

Для рассматриваемого примера

$$\det \mathcal{S}_{i,j}u_{i,j} = (a_1 + \kappa b_1 + \tau c_1)[\kappa\tau e^{x_i t_j}(\delta - 1) + \tau^2\delta\gamma(x_i,t_j)].$$

Если $\gamma(x,t) \equiv 0, \delta = 1$, то $\det \mathcal{S}_{i,j} = 0$ при любых h, τ, т.к. в формуле (4) $\Theta(\lambda,\mu) \equiv 0$. Система (9) может не иметь решений, тогда как сама система (5) разрешима. Если $\gamma(x,t) = te^{xt}$, то $\det \mathcal{S}_{i,j} \neq 0\ \forall i,j$ при достаточно малых τ и $a_1, b_1 > 0$. Однако сама система (5) может не иметь решения, если $f_2 \neq D_x f_3$. Процесс (9) расходится, если $\delta = 1$ и $|\gamma(x,t)| < 1$ хотя бы в одной точке $(x,t) \in \mathbf{U}$. Здесь $|u_{i,j}| = O(\omega^i), \omega = \max\left\{\frac{1}{\gamma(x,t)}, (x,t) \in \mathbf{U}\right\}$.

Определение 1. Пусть определены операторы

$$\Lambda_q(D_x)y = \sum_{j=0}^{q} A_j(x,t)D_x^j, \quad \Omega_\nu(D_x) = \sum_{j=0}^{\nu} L_j(x,t)D_x^j \quad (10)$$

где $A_j(x,t), L_j(x,t)$ – $(n \times n)$-матрицы со свойствами

$$\Omega_l(D_\nu) \circ \Lambda_q(D_x)y = \widehat{\Lambda}_q(D_x)y, \ \widehat{\Lambda}_q(D_x) = \sum_{j=0}^{q} \widehat{A}_j(x,t)D_x^j \ \ \forall y \equiv y(x,t) \in \mathbf{C}^\infty(\mathbf{U}) \quad (11)$$

где $\hat{A}_j(x,t)$ – $(n \times n)$-матрицы, причем $\hat{A}_q(x,t) \neq 0\ \forall (x,t) \in \mathbf{U}$. Тогда оператор $\Omega_\nu(D_x)$ называется левым регулязирующим оператором (ЛРО) для оператора $\Lambda_q(D_x)$, а

минимально возможное число ν – его индексом (левым). Соответственно, оператор $\Lambda_q(D_x)$ называется правым регулязирующим оператором (ПРО), а минимально возможное число q – его индексом (правым).

Теорема 1. Пусть для оператора системы

$$\Lambda_q(D_x)\mathrm{u} = \sum_{j=0}^{q} A_j(x,t)D_x^j\,\mathrm{u}(x,t) = \mathrm{f}(x,t)$$

Определен ЛРО. Тогда эта система уравнения разрешима и ее общее решение в области **U** имее вид

$$\mathrm{u}(x,t) = X_d(x,t)c(t) + \int_{x_0}^{x} K(x,s,t)\mathrm{f}(s,t)ds + \sum_{j=0}^{\nu-q} C_j(x,t)D_x^j\mathrm{f}(x,t)\,, \quad (12)$$

где $K(,x,s,t), C_j(x,t)$ – $(n\times n)$-матрицы, $X_d(x,t)$ – некоторая $(n\times d)$-матрица, $c(t)$ – произвольная вектор-функция. Если $\nu < q$, то выражение с дифференциальным оператором по x в правой части формулы (12) отсутствует.

Определение 2. Пусть существует оператор $\Omega_l(D_t,D_x) \coloneqq \sum_{j=0}^{l}\mathrm{L}_j(D_x)D_t^j$**,** где $\mathrm{L}_j(D_x) = \sum_{j=0}^{l_j} L_{j,i}(x,t)D_x^j$, $L_{j,i}(x,t)$ – $(n\times n)$-матрицы со свойством

$$\Omega_l(D_t,D_x)\circ\Lambda_k(D_t,D_x) \coloneqq \widehat{\Lambda}_k(D_t,D_x)y = \sum_{j=0}^{k}\hat{\mathcal{A}}_j(D_x)D_t^j\,y \;\; \forall y \equiv y(x,t) \in \mathbf{C}^{\infty}(\mathbf{U}), \quad (13)$$

Кроме того, для оператора $\hat{\mathcal{A}}_k(D_x)$ определен ЛРО. Тогда оператор $\Omega_l(D_t,D_x)$ называется левым регуляризирующим оператором по t для оператора $\Lambda_k(D_t,D_x)$, а минимально возможное число l назовем его индексом по t.

Итак, если для оператора $\hat{\mathcal{A}}_k(D_x)$ в формуле (13) определенЛРО, то система (1) с учетом равенства (12) приводима к системе интегро-дифференциальных уравнений, разрешенных относительно старших производных по t. В докладе, в частности, приводятся условия существования ЛРО для оператора $\Lambda_q(D_x)$. Для системы (5) можно принять

$$\Omega_1(D_t,D_x) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_1^{-1}(D_x) \end{pmatrix} D_t + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Авторы считают, что преодолеть сложности при использовании разностных методов для численного решения краевых задач для ДАУ в частных производных, которые возникли при анализе примера 1, можно с помощью метода наименьших квадратов.

Исходная задача сводится к поиску минимума функционала в соболевских пространствах

$$\Phi(\mathrm{u}) = \|\Lambda_1(D_t,D_x)\mathrm{u} - f(x,t)\|^2_{\mathbf{W}_2^{\kappa}(\mathbf{U})} + \|\mathrm{u}(x,t_0) - \phi(x)\|^2_{\mathbf{W}_2^{\varrho-1}(X)} + \|\mathrm{u}(x,t_0) - \psi(x)\|^2_{\mathbf{W}_2^{l-1}(T)},$$

где параметр ϱ – максимальный порядок производных в ЛРО по x, $\kappa = \max\{l-1,\varrho-1\}$ –мультииндекс. В докладе обсуждаются методики выбора координатных функций и оценки погрешности. Применение МНК для решения обыкновенных ДАУ рассматривалось в ряде статей авторов (см., например, [3] и приводимую там библиографию).

1. В. Ф. Чистяков, Е. В. Чистякова, Н. Х. Диеп. О понятии индекса линейных дифференциально-алгебраических уравнений в частных производных // Сиб. матем. журн., 61:5 (2020),1144–1158.

2. Годунов С.К. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1971.

3. В. Ф. Чистяков, Е. В. Чистякова. Применение метода наименьших квадратов для решения линейных дифференциально-алгебраических уравнений // Сиб. журн. вычисл. матем., 16:1 (2013), 81–95.

REGTAB: РАЗВИТИЕ БИБЛИОТЕКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕЛЯЦИОННЫХ ДАННЫХ ИЗ РЕДАКТИРУЕМЫХ ТАБЛИЦ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ ПАТТЕРНОВ*

А. О. Шигаров
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
shigarov@icc.ru

В жизненном цикле данных их первичная обработка (англ. Data Wrangling) рассматривается как критически важный подготовительный этап, на котором исходные данные сопровождаются метаинформацией, структурируются, очищаются, дополняются контекстной информацией, интегрируются и публикуются для упрощения последующего анализа и визуализации [1]. При этом предполагается, что исходные данные представлены в разнородных источниках, в том числе, неструктурированных. Одними из наиболее важных из них являются таблицы, представленные в документах редактируемых форматах: наборах значений, разделённых запятыми, рабочих книгах, веб-страницах и пр. Часто такие данные предназначены для чтения человеком, но не для интерпретации компьютерными программами. Прежде всего, они должны быть извлечены из источников и организованы в подходящем структурированном формате. Данная задача, которую принято называть *структурированием данных*, является одной из самых сложных в цепочке процесса первичной обработки данных.

В литературе можно найти множество решений этой задачи [2]. Традиционно акцент делался на развитии специализированных программируемых систем для конечных пользователей, обеспечивающих «программирование по примерам», проблемно-ориентированные языки и человеко-машинные интерфейсы. Также предлагались различные непрограммируемые предметно-зависимые решения, основанные на правилах и машинном обучении. Недавние достижения в области больших языковых моделей (LLMs) предлагают многообещающую альтернативу, часто заменяющую необходимость в этих специализированных решениях. Тем не менее, учитывая современное состояние информационных технологий, эффективность и надежность структурирования табличных данных по-прежнему в значительной степени зависит от вмешательства конечных пользователей. Необходимость сокращения ручного труда делает автоматизацию структурирования табличных данных критически важной исследовательской проблемой. Она имеет важное практическое значение, поскольку ее решение повышает эффективность и надежность подготовки больших объемов табличных данных из документов для использования в реальных приложениях.

В докладе представлена новая версия библиотеки RegTab [2], предназначенной для разработки прикладного программного обеспечения структурирования табличных данных на основе сопоставления таблиц с паттернами их структуры. В ее состав входит интерпретируемая модель таблицы (ИМТ) и проблемно-ориентированный язык

* Работа выполнена в рамках крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития — «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант № 075-15-2024-533).

паттернов табличных структур (RTL). В отличие от существующих аналогов, ИМТ включает в себя не только статическую структуру таблицы, но и логику ее интерпретации, достаточную для автоматического вывода из таблицы наборов записей, а RTL предоставляет конечным пользователям понятную методику структурирования таблиц за счет описания логики интерпретации таблиц непосредственно в RTL-паттернах. Успешное сопоставление RTL-паттернов с экземплярами ИТМ дополняет последние интерпретационной логикой, что позволяет автоматически выводить из них записи в соответствии с целевой схемой.

Экспериментальные результаты на известном тесте производительности Foofah подтверждают пригодность метода для реальных приложений. Текущая версия RegTab позволила подготовить RTL-паттерны для всех 50 тестовых задач (сценариев трансформации табличных данных) из коллекции Foofah и успешно выполнить все 250 вариантов этих задач без каких-либо ошибок. Насколько известно авторам, ни одно из программных средств трансформации табличных данных на основе пользовательского программирования, которые также тестировались на коллекции Foofah [4–6], принципиально не позволяло выполнить все тестовые задачи. Кроме того, ни одна из протестированных авторами, больших языковых моделей, а именно: DeepSeek V3, DeepSeek Coder V2, Gemma 2 7B, Gemma 3 7B, GigaChat 20B, Mistral Small, YndexGPT 5 Lite, не была способна сгенерировать корректные Python-скрипты для всех сценариев коллекции Foofah даже с пяти попыток, при увеличении детализации примеров входа-выхода трансформации табличных данных на каждой попытке. Лучший результат показала модель DeepSeek V3 с долей успешно выполненных тестовых задач 84 % и отсутствием роста результатов после 4 попытки.

В последней версии RegTab проблемно-ориентированный язык RTL был дополнен новой функциональностью: реализована возможность включения конфигурации настроек непосредственно в RTL-паттерн; реализована возможность поиска функциональных компонентов данных внутри подстрок и подтаблиц; реализована возможность включения в паттерн ячейки переменного числа функциональных компонентов, разделенных некоторым сепаратором. Перечисленные усовершенствования позволили успешно применить RTL-паттерны ко всем тестовым задачам коллекции Foofah. Кроме того, усовершенствовано демонстрационное веб-ориентированное приложение RTO*, которым можно воспользоваться онлайн для знакомства с новой версией RegTab и языком RTL. Новая версия библиотеки RegTab† опубликовано в открытом доступе под свободной лицензией. Будучи библиотекой Java, она обеспечивает включение RTL-паттернов в исходный код, разработанный с использованием языков программирования общего назначения, компилируемых в байт-код Java.

Библиотека RegTab была применена для реализации процесса первичной обработки открытых данных государственного мониторинга окружающей среды озера Байкал и Байкальской природной территории. В этом процессе исходные данные извлекаются из документных таблиц, представленных в государственных докладах, и структурируются посредством их сопоставления с RTL-паттернами. К настоящему моменту реализована опытная обработка 23 классов таблиц, содержащих данные по различным загрязнениям окружающей среды. На основе интеграции наборов записей, извлеченных из исходных таблиц, сформирована единая база данных в составе Геопортала ИДСТУ СО РАН. В дальнейшем планируется описать остальные классы таблиц, которые также встречаются в государственных докладах.

* https://regtab.icc.ru
† https://github.com/regtab/regtab

1. Rattenbury T., Hellerstein J., Heer J., Kandel S., Carreras C. Principles of data wrangling: practical techniques for data preparation (1st. ed.). O'Reilly Media, Inc. 2017.
2. Shigarov A. Table understanding: problem overview // WIREs Data Mining and Knowledge Discovery. 2023. V. 13, N. 1, A. e1482.
3. Shigarov A. Regular table language for data extraction from document tables accessible in machine-readable formats // Lobachevskii J. Math. 2025. V. 46, N. 4, P. 1495–1510.
4. Jin Z., Anderson M. R., Cafarella M., Jagadish H. V. Foofah: transforming data by example // In Proc. 2017 ACM Int. Conf. on Management of Data. 2017. P. 683–698.
5. Harris W., Gulwani S. Spreadsheet table transformations from examples // In PLDI. 2011.
6. Barowy D., Gulwani S., Hart T., Zorn B. FlashRelate: Extracting relational data from semi-structured spreadsheets using examples // In PLDI. 2015.

МЕТОД АНАЛИЗА СХОЖЕСТИ ИСХОДНОГО КОДА НА ОСНОВЕ ХЭШЕЙ АБСТРАКТНЫХ СИНТАКСИЧЕСКИХ ДЕРЕВЬЕВ

М. Н. Шипицын, Р. К. Фёдоров
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
1markus243@gmail.com, fedorov@icc.ru

Разработка методов представления исходного программного кода играет ключевую роль в создании современных инструментов анализа и обработки кода. Одним из наиболее распространенных представлений исходного кода является абстрактное синтаксическое дерево (AST) – древовидная структура данных, состоящая из узлов, таких как операторы языка, выражения, переменные и функции. Использование деревьев AST позволяет учитывать вложенность подпрограмм, порядок вызова функций, важную семантику применения операторов. С помощью AST также можно находить общие участки исходного кода, имеющие структурное и синтаксическое сходство.

Абстрактное синтаксическое дерево зачастую становится заметно объемнее исходного кода, из которого оно получено, за счет более формальной типизации операторов языка. При этом операции над деревьями также являются вычислительно более сложными и сложнее поддаются параллелизации. Ввиду этого многие методы анализа исходного кода полагаются на разбор исключительно текстового представления, опуская важную структурную информацию из AST. Создание более оптимизированных промежуточных представлений из AST исходного кода в настоящее время является перспективной областью исследований [1, 2], и позволит учитывать структурные особенности исходного кода при его анализе.

В данной работе предложен метод представления абстрактных синтаксических деревьев в виде векторов вхождений поддеревьев AST в него. Исходный код преобразуется в AST средствами стандартной библиотеки Python [3], затем для каждого узла дерева с помощью обхода в глубину и хэш-функции вычисляется число, однозначно соответствующее либо значению узла дерева, если это узел без поддеревьев, либо поддереву AST. В результате дерево AST и все его поддеревья и узлы представляют собой множество значений H_i, образующих модель мешка слов (Bag of Words), состоящую из хэш-значений. Использование данного метода позволяет быстро сравнивать части программы между собой путем сравнения хэш-значений только верхних элементов дерева, однозначно определяющих нижеследующие элементы в поддереве. Помимо этого, становится возможным представить исходный код в виде вектора вхождений хэш-значений его поддеревьев: попарное объединение всех множеств H_i для набора программ представляет собой общее известное множество хэш-значений деревьев H. На выходе получаем вектор размерности, равной числу элементов в H, где вхождению хэш-значения из H_i в H присваивается 1, в противном случае – 0. Полученные таким образом вектора вхождений хэш-значений можно использовать для решения задач поиска схожего исходного кода и обнаружения дубликатов.

1. A General Path-Based Representation for Predicting Program Properties / U. Alon, M. Zilberstein, O. Levy, E. Yahav // arXiv. – 2018. – URL: https://arxiv.org/abs/1803.09544
2. J. Zhang et al. A Novel Neural Source Code Representation Based on Abstract Syntax Tree // Proc. of the 41st Int. Conf. on Software Engineering (ICSE). Montreal, Canada, 2019. P. 783–794.
3. ast – Abstract syntax trees – Python 3.14.0 documentation [Electronic resource]. – URL: https://docs.python.org/3/library/ast.html (accessed 23 September 2025).

ОБУЧЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ШРИФТОВ*

М. В. Щурик, Д. Е. Копылов
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
Иркутский государственный университет
marriiamnii@gmail.com, it-daniil@yandex.ru

Задача исследования заключается в формировании векторных представлений шрифтов для автоматического анализа стилевых особенностей при обработке документов. В работе предлагается подход к созданию компактных векторных представлений шрифтов, независимых от конкретных символов. Основная цель – извлечение как можно большего количества стилевых признаков из изображений символов. Информация о шрифте часто несет дополнительную семантическую нагрузку: различие начертаний может маркировать смысловые разделы документа, а их стилистические особенности – указывать на его тип. Таким образом, извлечение и анализ стилевых признаков шрифтов обеспечивает более глубокое понимание визуальной структуры текста и способствует повышению эффективности в задаче обработки документов [1].

Важную часть исследования составляет подготовка данных. Для параметрического представления шрифтов использовалась система признаков, приведённая в таблице 1.

Таблица 2 – Классификация признаков шрифтов

Признак	Вариации	Признак	Вариации
Начертание	Тонкий	Засечки	Гротеск
	Обычный		Антиква
	Жирный		Брусковый
Наклон	Наклонный	Рукописность	Рукописный
	Не наклонный		Печатный
Моноширинность	Моноширинный	Форма	Прямоугольный
	Не моноширинный		Круглый

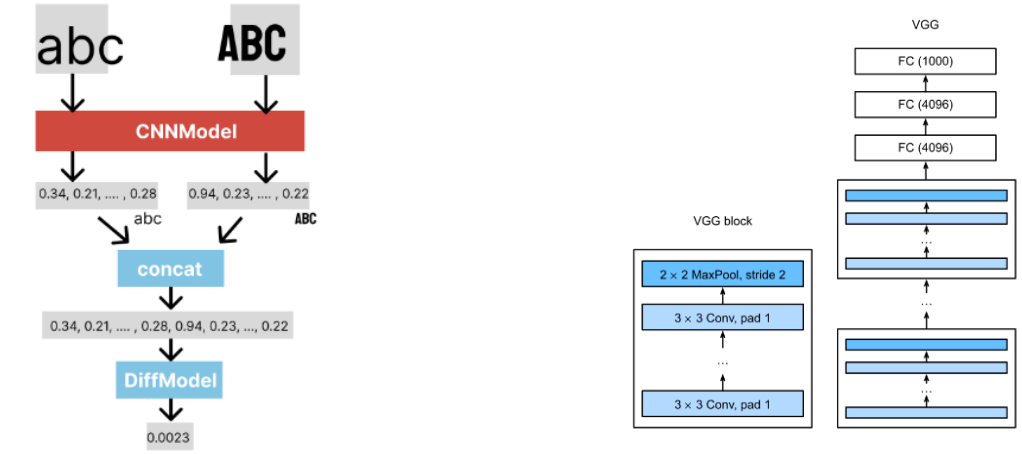
Были сформированы три набора данных: выборка из коллекции шрифтов, представленных в офисных пакетах, таких как Microsoft Word, вариативные шрифты с изменяемыми параметрами (жирность, наклон, ширина), а также их комбинации.

Для получения векторных представлений шрифтов было рассмотрено два подхода. Оба подхода реализованы с помощью библиотеки PyTorch на языке программирования Python [4].

Первый подход основан на прямом обучении сверточной нейронной сети, архитектура которой вдохновлена VGG-NET [2, с. 955], применяемой для решения задачи сравнения стилевых характеристик шрифтов. Архитектура модели включает в себя два компонента: сверточную нейронную сеть для генерации 8-мерных векторных представлений и модель DiffModel для их сравнения «рис. 1 (а)». Данная архитектура

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9).

представляет собой блоки, состоящие из сверточных слоев и функции MaxPooling «рис. 1 (б)». DiffModel – модель, которая на выходе представляет собой бинарный классификатор. В работе рассматривается модель с одним VGG.



а б

Рисунок 1. Архитектура модели (а) и архитектура VGG-NET (б)

Во втором подходе в качестве улучшения был применен метод контрастного обучения, при котором векторные представления формируются с помощью сети ResNet-18 (рис. 2). Основная идея метода заключается в обучении модели попарно различать шрифты, в результате чего формируется пространство признаков, где векторные представления изображений с одинаковыми стилями шрифтов располагаются близко друг к другу, а с различными – на значительном расстоянии [3]. Здесь ключевым этапом является правильное определение положительных и отрицательных пар. Учитывая, что основное внимание уделяется стилевым характеристикам шрифта, положительная пара формируется из изображений с различным текстовым содержимым, но идентичными стилевыми особенностями шрифтов. Все остальные изображения с отличающимися стилями рассматриваются как отрицательные пары.

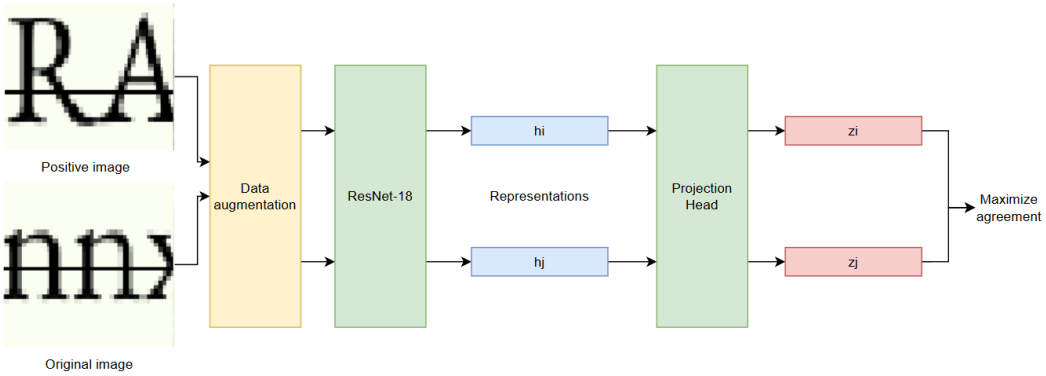


Рисунок 2. Архитектура модели контрастного обучения

В дальнейшем обе модели были протестированы на задаче сравнения стилей шрифтов. Тестирование проводилось на разных наборах данных. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 3 – Точность для задачи сравнения стилей шрифтов

	Стандартный набор данных	Вариативный набор данных	Смешанный набор данных
VGG	0.8854	0.9054	0.8954
ResNet-18	0.8107	0.8567	0.8353

Для проверки информативности полученных векторных представлений были решены задачи классификации по жирности и наклону. Обе модели были дообучены на 5 000 изображений.

Таблица 3 – Точность для задач классификации по жирности и наклону

	Жирность	Наклон
VGG	0.96	0.59
ResNet-18	0.87	0.51

Результаты экспериментов показали, что модели демонстрируют сопоставимую точность при тестировании. Несмотря на применение методов контрастного обучения и более сложной модели, точность модели не увеличилась. В частности, отмечается сохранение проблемы распознавания наклона. Это является индикатором того, что проблема полноты признаков в векторных представлениях кроется в методах формирования данных. Дальнейшая перспектива исследования заключается в комплексном подходе к формированию признаков стилей шрифтов, структуре набора данных и группировке пар стилей.

1. Lecun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-based learning applied to document recognition // Proceedings of the IEEE, 1998. Vol. 86, No 11. P. 2278-2324. DOI: 10.1109/5.726791.
2. Swapna M., Sharma Y., Prasad B. CNN Architectures: Alex Net, Le Net, VGG, Google Net, Res Net // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), 2020. Vol. 8, No 6. P. 953–959. DOI: 10.35940/ijrte.F9532.038620.
3. Chen T., Kornblith S., Norouzi M., Hinton G. A Simple Framework for Contrastive Learning of Visual Representations // *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2020. Vol. 119. P. 1597-1607. DOI: 10.5555/3524938.3525087.
4. PyTorch documentation [Электронный ресурс]. – URL: https://docs.pytorch.org/docs/stable/ (дата обращения: 10.09.2025).

ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИГРОВЫХ МОДЕЛЕЙНА ОСНОВЕ РЕДУКЦИИ К ЗАДАЧЕ НЕВЫПУКЛОЙ ОПТИМИЗАЦИИ*

Р. Энхбат[1], А. Ю. Горнов[2], П. С. Сороковиков[2]
[1]Институт математики и цифровых технологий, Монгольская академия наук
[2]Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
gornov@icc.ru

Среди специалистов по теории биматричных игр наблюдается две парадигмы о возможных подходах к их численному решению. Одним из наиболее популярных можно назвать способ сведения игры к задаче нелинейного программирования. Другой подход, также имеющий много последователей, гласит, что если имеется возможность свести игру к задаче оптимизации «конструктивных размеров», то «это вообще не игра».

В наших работах, соответствующих первому подходу, был подготовлен ряд публикаций (см., напр., [1–5]), в которых, помимо теоретических оснований, представлен также целый ряд успешно решенных игровых задач. Однако по прошествии времени мы обнаружили, что в эти статьи не вошло, возможно, самое главное: какие проблемы возникают при рассмотрении редуцированных экстремальных задач, и что нужно сделать, чтобы можно было надежно получать их численные решения?

В докладе рассматриваются особенности задач математического программирования, формируемых при выполнении редукций игровых моделей, и обсуждается общая вычислительная технология их решения, позволяющая получать набор решений этих задач за разумное время. Во-первых, практически во всех случаях редуцированные задачи являются невыпуклыми. Второй распространенной особенностью можно назвать их вырожденность: в несложных моделях зачастую правильными решениями исходной игры являются не точки, а целые отрезки в допустимом множестве вариантов.

Но в качестве главной, чаще всего незаметной на начальных этапах решения, особенности, можно указать проявление паразитических экстремумов в области определения редуцированных функционалов, причем экстремумов с критически большой областью притяжения: алгоритмы находят множество локальных экстремумов, все из которых не являются решениями. Удобным приемом борьбы с этой особенностью можно назвать повышение штрафных коэффициентов, отвечающих за выполнение соответствующих ограничений; на практике для урезания нефизических вариантов величины этих коэффициентов должны быть очень большими: 10^6 и более. Это, к сожалению, пока единственная нам известная технология быстрого численного решения рассматриваемых задач. Для эффективного исследования задач с плохо обусловленными функционалами обычно не удается использовать градиентные подходы; мы применяем поисковые алгоритмы; хорошо работает, например, глобализованный метод Пауэлла.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

1. Enkhbat R., Natsagdorj T., Gornov A.Yu., Anikin A.S. The Curvilinear Search Algorithm for Solving Three-Person Game // Proc. CEUR Workshop Proc. 9th DOOR 2016. Vol. 1623. P. 574–583.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023110300006-9).

2. Enkhbat R., Batbileg S., Tungalag N., Anikin A., Gornov A. A Computational Method for Solving N-Person Game // Известия Иркутского гос. ун-та. Сер. Математика. 2017. Vol. 20. P. 109–121.
3. Enkhbat R., Batbileg S., Anikin A., Tungalag N., Gornov A. A Note on Four-Players Triple Game // Contributions to Game Theory and Management. 2019. Vol. 12. P. 100–112.
4. Enkhbat R., Batbileg S., Tungalag N., Anikin A., Gornov A. A global optimization approach to nonzero sum six-person game // Annals of the Int. Society of Dynamic Games. 2020. V. 16. P. 219–227.
5. Энхбат Р., Сороковиков П.С., Горнов А.Ю. Методика численного решения задачи поиска равновесия «анти-Бержа» в биматричной игре // Ляпуновские чтения, 2022. С. 159–160.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАБОТЫ С МЕТЕОДАННЫМИ*

Е. А. Юмашев
Институт динамики систем и теории управления имени. В. М. Матросова СО РАН
Иркутский государственный университет путей сообщения
yumashevgeny@mail.ru

Информация о метеорологических данных, их изменениях и пространственно-временных закономерностях представляет собой ключевой элемент в системах анализа и прогноза природных и техногенных процессов. Актуальность использования метеорологических данных возрастает в условиях климатической нестабильности и усиливающегося влияния внешних факторов на состояние окружающей среды. В частности, метеорологические параметры являются неотъемлемой составляющей в задачах экологического мониторинга, включая моделирование распространения загрязняющих веществ, оценку устойчивости экосистем, а также построение сценариев развития климатических условий. Современные подходы к экологическому мониторингу требуют оперативного доступа к достоверной и актуальной информации. Однако на практике получение метеорологических данных сопряжено с рядом затруднений: разнородностью форматов хранения, распределенностью источников, отсутствием единых протоколов доступа, а также необходимостью значительных временных и вычислительных затрат на предварительную обработку данных. Эти ограничения существенно снижают эффективность интеграции метеоданных в прикладные и научные задачи. В целях преодоления указанных проблем разработана специализированная сервис-ориентированная технология [1] для комплексной работы с ретроспективными метеорологическими данными из открытых источников.

В данной работе представлен сравнительный анализ существующих сервис-ориентированных подходов, применяемых для работы с метеоданными. В качестве критериев сравнения выделены ключевые этапы работы с данными – получение, обработка и анализ, а также применение полученных результатов и назначение технологии. Проведенный сравнительный анализ существующих технологий выявил преимущества предложенного решения [1] в части автоматизации, интеграции этапов обработки и универсальности применения в задачах экологического мониторинга [2]. Вместе с тем, определены перспективные направления дальнейших исследований, включающие оптимизацию вычислительной производительности и расширение функциональной составляющей разработанной технологии.

1. Юмашев Е.А. Методология анализа и обработки временных рядов метеорологических данных // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 5. С. 107–112.
2. Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Воскобойников М.Л., Чекан М.А., Яковлев Д.С., Боднюк М.Е., Николаев Е.П., Юмашев Е.А., Еделев Я.А. Моделирование природно-технических систем: инструментальная поддержка // Материалы Выездного совещания участников проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», 27 августа 2025 г., г. Белокуриха, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2025. С. 22–26.

* Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

МИНИМАЛЬНЫЙ ОСТАТОЧНЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ МНОГОРАСЩЕПЛЁННЫЙ МЕТОД ДЛЯ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ С НЕЭРМИТОВСКОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОПРЕДЕЛЁННОЙ МАТРИЦЕЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Юн Ок, Ким Юн Чхор
Политехнический университет имени Ким Чака, Пхеньян, КНДР
yo86728@star-co.net.kp

Аннотация: Мы предлагаем параллельный многорасщеплённый итеративный метод, который использует минимальную остаточную технику на каждом этапе итерации для решения системы линейных уравнений с неэрмитовской положительной определённой матрицей коэффициентов. Мы доказываем, что минимальный остаточный параллельный многорасщеплённый итеративный метод сходится, и показываем осуществимость и эффективность метода через числовые примеры.

Ключевые слова: параллельный многорасщеплённый итеративный метод, система линейных уравнений, неэрмитовская положительная определённая матрица.

Введение

Многие проблемы в инженерии и практике приводят к решению линейных систем уравнений,

$$Ax = b, \quad A = (a_{ij}) \in C^{n\times n}, \ b, x \in C^n \tag{1}$$

где A – это матрица коэффициентов, которая является неэрмитовской положительной определённой матрицей, т. е. эрмитовская часть $H=(A+A^*)/2$ – положительная определённая матрица, а b – постоянный вектор, а X – переменный вектор.

Линейная система уравнений (1) появляются во многих проблемах, таких как дискретизация проблем вычислительной гидродинамики, проблем условной оптимизации, проблем взвешенных наименьших квадратов, проблем конвективной диффузии.

Параллельный многорасщеплнный итеративный метод для решения системы линейных уравнений впервые изучался в [6], и процесс может быть записан следующим образом.

$$\begin{aligned} &A = M_i - N_i, && i = 1,2,\ldots,m \\ &M_i x_i^{(k)} = N_i x^{(k-1)} + b, && k = 1,2,\ldots \\ &x^{(k)} = \sum_{i=1}^{m} E_i x_i^{(k)} \end{aligned} \tag{2}$$

где E_i называется весовая матрица, которая является диагональная матрица с неотрицательными элементами, удовлетворяющими $\sum_{i=1}^{m} E_i = I$.

Коллекция триплета $(M_i, N_i, E_i)_{i=1}^{m}$ называется расщеплением матрицы A.

1. Минимальный остаточный параллельный многорасщеплённый итеративный метод.

Для удобства мы введем следующие символы.

X^*: транспонированная сопряжённая матрица (или вектор) матрицы X (или вектор), Пусть $A \succ 0$, если A–это эрмитовская положительная определённая матрица.

Для комплексной матрицы A мы введем следующие символы.

$$H(A)=\frac{1}{2}(A+A^*),\ \ S(A)=\frac{1}{2}(A-A^*)$$

Для остальных векторов $r^{(k)}=b-Ax^{(k)}$, если $\left\|r^{(k)}\right\|\le\sigma^k\left\|r^{(0)}\right\|$ удовлетворит, скорость сходимости q определяется следующим образом.

$$q=-\ln\sigma$$

Теперь давайте посмотрим на минимальный остаточный параллельный многорасщеплённый итеративный метод.

$$A=M_i-N_i,\qquad i=1,2,...,m$$

$$M_i x_i^{(k)}=N_i x^{(k-1)}+b,\quad k=1,2,...$$

$$x^{(k)}=\sum_{i=1}^{m}E_i^{(k)}x_i^{(k)},\ k=1,2,...$$

где M_1 является эрмитовской положительной определённой матрицей, весовая матрица $E_i^{(k)}$ удовлетворяет $E_i^{(k)}=\alpha_i^{(k)}I,\ i=1,2,...,m,\ k=1,2,...$, а , $\alpha_i^{(k)}$ решают следующую проблему квадратичной программирования и обязательно нет удовлетворять сходимости для $M_i, i=2,...,m$.

$$\min_{\alpha}\frac{1}{2}r*r,\quad r=A\left(\sum_{i=1}^{m}\alpha_i^{(k)}x_i^{(k)}\right)-b$$

Для ускорения схемы итерации (6) мы применяем минимальную остаточную технику.

$$x_i^{(k)}=x^{(k-1)}+\delta_i^{(k-1)},\quad \delta_i^{(k-1)}=M_i^{-1}r^{(k-1)}$$

Представляя параметры $\omega_i^{(k-1)}$, итерационная схема построена следующим образом.

$$x_i^{(k)}=x^{(k-1)}+\omega_i^{(k-1)}\delta_i^{(k-1)},$$

где $\omega_i^{(k-1)}$ определяется следующим образом, чтобы остальная часть была минимальной.

$$\omega_i^{(k-1)}=\frac{(r^{(k-1)},A\delta_i^{(k-1)})}{\left\|A\delta_i^{(k-1)}\right\|^2}$$

Алгоритм

– Вход

- $n\times n$ матрица — $A=M_i-N_i,\ i=1,2,...,m$, n×1 вектор — b
- начальный приближённый вектор $x^{(0)}=(x_1^{(0)},x_2^{(0)},...,x_n^{(0)})^T$
- пределы ошибок ε

Для k=1,2,… мы повторяем следующий процесс.

Этап 1: $x_i^{(k)}=x^{(k-1)}+\omega_i^{(k-1)}\delta_i^{(k-1)},\ \ i=1,2,...,m$

Здесь $\omega_i^{(k-1)}=\frac{(r^{(k-1)},A\delta_i^{(k-1)})}{\left\|A\delta_i^{(k-1)}\right\|^2}\ \ \delta_i^{(k-1)}=M_i^{-1}r^{(k-1)}$,

Этап 2: $x^{(k)}=\sum_{i=1}^{m}\alpha_i^{(k)}x_i^{(k)},\ k=1,2,...$

Здесь $\alpha^{(k)}=(\alpha_1^{(k)},\alpha_2^{(k)},...,\alpha_m^{(k)})$ является решение следующей задачи квадратичной программирования.

$$\min_{\alpha} \frac{1}{2} r * r, \quad r = A\left(\sum_{i=1}^{m} \alpha_i^{(k)} x_i^{(k)}\right) - b$$

$$\alpha^{(k)} = (X(k) * A * AX(k))^{-1} X(k) * A * b, \; X(k) = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, ..., x_m^{(k)})$$

Этап 3: $\left\|r^{(k)}\right\| < \varepsilon$ завершает. Если нет, нажмите на этап 1, а затем k = k + 1.

2. Численные опыты

Рассмотрим численный пример, который демонстрирует эффективность алгоритма. Начальное значение выбрало нулевый вектор и допустимый уровень было установлено в $\left\|r^{(k)}\right\| \leq 10^{-6}$. Сравнение характеристики алгоритма было выполнено с использованием итерационного числа (IT), а численные вычисления были выполнены в Matlab2018a.

[Пример]([4]) Рассмотрим следующее уравнение конвективной диффузии.

$$\begin{cases} -P_e^{-1} \Delta u + \frac{1}{2}\left[v_1 \frac{\partial u}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial (v_1 u)}{\partial x} + \frac{\partial (v_2 u)}{\partial y}\right] = g, & (x, y) \in \Omega \\ u = 0, & (x, y) \in \partial\Omega \end{cases}$$

Здесь Ω= (0,1) x (0,1), а v_1, v_2 - это непрерывная функция, приведенная в таблице 1.

Таблица 1– Экспериментальная задача

задача	$v_1(x, y)$	$v_2(x, y)$
1	1	-1
2	$1 - 2x$	$2y - 1$
3	$x + y$	$x - y$

Численные вычисления были выполнены для $N = 32$ и Pe=10.

Численные результаты (число итераций) минимального остаточного параллельного многорасщеплённого итеративного алгоритма и алгоритма 2.3 в [7] показаны в таблице 2.

Таблица 2– Сравнение характеристики алгоритма

метод / задача	алгоритм2.3([7])	минимальный остаточный параллельный многорасщеплённый итеративный алгоритм
Задача 1	938	459
Задача 2	581	315
Задача 3	646	374

Благодаря численным результатам эффективность предлагаемого алгоритма проверяется.

1. Z.Z. Bai, C.L. Wang, Convergence theorems for parallel multisplitting two-stage iterative methods for mildly nonlinear systems, Linear Algebra Appl. 362, 237–250 (2003).
2. Z.Z. Bai, J.F. Yin, Y.F. Su, A shift-splitting preconditioner for non-Hermitian positive definite matrices, J. Comput. Math. 24, 539–552 (2006).
3. Z.H. Cao, Y. Wang, On validity of m-step multisplitting preconditioners for linear systems, Appl. Math. Comput. 126, 199–211 (2002).

4. L.A. Krukier, T.S. Martynova, Z.Z Bai, Product-type skew-Hermitian triangular splitting iteration methods for strongly non-Hermitian positive definite linear systems, Journal of Computational and Applied Mathematics 232, 3–16 (2009).
5. M. Neumann, R.J. Plemmons, Convergence of parallel multisplitting iterative methods for M-matrices, Linear Algebra Appl. 88, 559–573 (1987).
6. D.P. O'Leary, R. White, Multi-splittings of matrices and parallel solutions of linear systems, SIAM J. Algebra Discrete Methods 6, 630–640 (1985).
7. C.L. Wang, G.Y. Meng, X.R. Yong, Modified parallel multisplitting iterative methods for non-Hermitian positive definite systems, Adv Comput Math 38, 859–872 (2013).
8. A.L. Yang, Y. Cao, Y.J. Wu, Minimum residual Hermitian and skew-Hermitian splitting iteration method for non-Hermitian positive definite linear systems, BIT 59, 299–319 (2019).
9. A.L. Yang, Y.X. Dai, K.H. Wang, Z.C. Zhang, Minimum residual shift-splitting iteration method for non-Hermitian positive definite and positive semidefinite linear, Applied Mathematics Letters 159, 109254 (2025).

ТАБЛИЦЫ РЕШЕНИЙ: СПОСОБ РЕЛИЗАЦИИ БАЗ ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АССИСТЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ

А. Ю. Юрин, Н. О. Дородных
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
iskander@icc.ru

В рамках развития и применения модельно-ориентированной технологии построения декларативных баз знаний (БЗ) [1] решалась задача повышения эффективности создания интеллектуальных ассистентов для диагностирования технических систем. В качестве предметной области были выбраны гражданские воздушные суда, в частности, Cessna 182T, что позволило использовать наработки авторов по платформе АвиаТехПом (Авиационный технический помощник) [2].

Развитие технологии связано с совершенствованием поддержки формализма таблиц решений, для моделирования которых используется программная система Knowledge Modeling System (KMS) [3], а также специализированный редактор платформы АвиаТехПом.

Созданные таблицы решений фактически реализуют формализм логических правил (продукций), с помощью которых описываются взаимосвязи между внешними проявлениями неисправностей и причинами их возникновения, причинами и работами по их локализации, а также прецеденты, фиксирующие подобные неисправности в прошлом, формируя гибридную БЗ.

Разработанная БЗ использована в приложении АвиаТехПом.Ассистент (Рис.1) [4], созданного с помощью средства Just AI, БЗ сериализована в формате CSV.

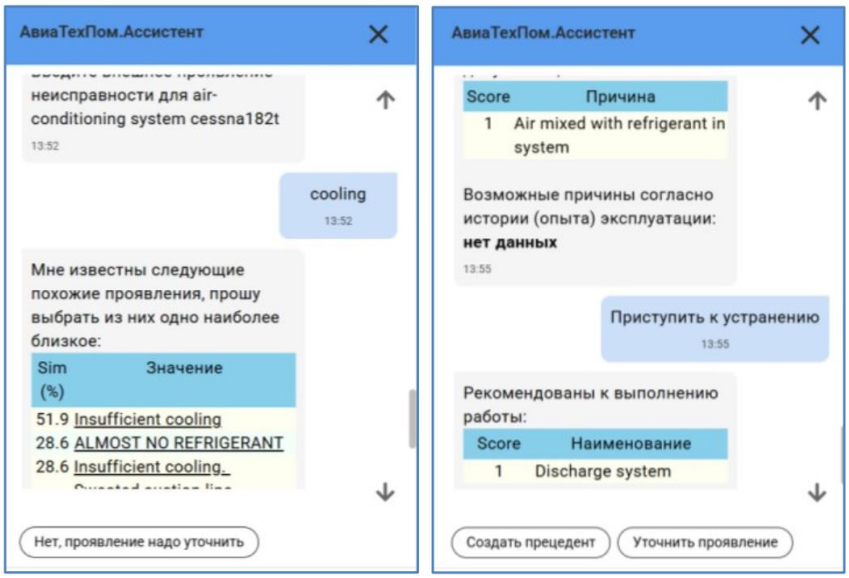


Рисунок 1 Примеры экранов АвиаТехПом.Ассистент

1. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Технология создания продукционных экспертных систем на основе модельных трансформаций: СО РАН, 2019. 144 с.
2. Котлов Ю.В., Юрин А.Ю. АвиаТехПом: Состояние и перспективы // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2024. № 1. С. 146-156. DOI: 10.51955/2312-1327_2024_1_146

3. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Программная реализация алгоритмов для создания прототипов баз знаний на основе визуального моделирования и трансформаций // Программные продукты и системы. 2024. №3. С. 324-333.
4. Юрин А.Ю. АвиаТехПом.Ассистент // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. М. Рег. № 2025616049 от 13.03.25.

РАЗВИТИЕ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ REGTAB ONLINE ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДАННЫХ ИЗ РЕДАКТИРУЕМЫХ ТАБЛИЦ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ RTL-ПАТТЕРНОВ[*]

И. С. Ясеновский, А. О. Шигаров
Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН
ilyasenovskey0@mail.ru, shigarov@icc.ru

В работе представлено обновленное веб-приложение «RegTab Online»[†], разработанное для извлечения реляционных данных из редактируемых таблиц с произвольной структурой с использованием RTL-паттернов. Извлечение данных осуществляется непосредственно с помощью инструментального средства «RegTab API»[‡], разработанного в ИДСТУ СО РАН.

Обновленное веб-приложение «RegTab Online» реализует расширенную функциональность, обеспечивающую интерактивное выполнение рабочего процесса извлечения данных из редактируемых таблиц: загрузку и визуализацию исходных таблиц; редактирование RTL-паттернов с автоматическим дополнением, подсветкой синтаксиса и диагностикой ошибок компиляции; запуск сопоставления исходных таблиц с RTL-паттернами и просмотром результатов извлечения; создание и публикация ссылок на выполненные запуски для повторного доступа к их результатам; предпросмотр примеров и их дальнейший запуск; просмотр документации по RTL-языку; визуализацию извлеченных наборов записей; доступ к истории пользовательских запусков.

Клиентская часть приложения была полностью переработана для повышения интерактивности и удобства работы пользователя. Она реализована на современной версии фреймворка Vue.js, обеспечивающей гибкость интерфейса и интерактивное обновление данных без перезагрузки страницы. Серверная часть включает три взаимосвязанных сервиса: сервис управления запусками извлечения данных с использованием «RegTab API» (реализован на Spring Boot); сервис управления доступом пользователей (на основе системы Keycloak); сервис хранения пользовательских данных (на основе «PostgeSQL»).

[*] Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

[†] https://regtab.icc.ru

[‡] https://github.com/regtab/regtab

СЕКЦИЯ «ЮНЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛИ»

УРНЫ, ПРЕДУПРЕЖДАЮЩИЕ О ПЕРЕПОЛНЕНИИ

А. И. Алексеенко
МБОУ «Лицей №2» г. Братска
alenka.al2007@gmail.com

Промышленный и бытовой мусор, отходы – это глобальная экологическая проблема современности, которая несет угрозу для здоровья людей, а также загрязняет окружающую среду. В нашем мире существует огромное количество путей решения данной проблемы: от сортировки мусора до его переработки и дальнейшего использования. Но все забывают о самом простом: об использовании в повседневной жизни урн.

Для решения данной проблемы я выбрала такую тему: «Урны, предупреждающие о переполнении». Она заинтересовала меня, так как я сама часто сталкиваюсь с проблемой переполненности урн и очень часто вижу, как люди нашего города испытывают такие же трудности. В нашем городе я еще не встречала похожих технологий, так что решила разработать урну, оснащенную специальными датчиками.

Целью моего проекта является создание «умной» урны, оснащенной датчиками с микроконтроллерами Arduino, для предупреждения людей о переполнении урны мусором.

Чтобы добиться своей цели, я разделила всю работу на несколько задач:

1) Собрать и проанализировать информацию о существующих на данный момент «умных» урнах.

2) Спроектировать урну, удобную для использования конечными пользователями.

3) Создать урну и оснастить ее подходящими датчиками Arduino.

4) Создать программу, собирающую информацию с датчиков и передающую ее пользователям, для дальнейшего использования.

5) Апробировать удобность пользования урной и программой.

Итоговым продуктом проектной деятельности станет урна, оснащенная специальными датчиками и микроконтроллером Arduino.

В своей работе я воспользовалась таким понятием, как «Интернет вещей» и пришла к выводу, что это концепция, при которой различные физические объекты, в моем случае устройства, обладают доступом выхода в Интернет и могут использовать его различные функции.

После этого мной были рассмотрены несколько вариантов уже существующих «умных» урн, и после сравнения я проанализировала все их преимущества и недостатки и поняла в, каком именно виде я буду делать свою урну, и какую конструкцию выберу, что также поможет мне сделать ее универсальной.

Дальше я начала создание урны: спроектировала и построила конструкцию из фанеры и металлического профиля. После, я прикрепила к ней ультразвуковой датчик HC-SR04 (устройство, предназначенное для определения расстояния от датчика до объекта), соединенный с платой Wemos D1 R2. С помощью этой платы в итоге стал возможен вывод данных с датчика пользователям. Для датчика я написала программу в среде разработки «Arduino» на языке C++ и создала сайт для того, чтобы пользователи могли пользоваться данными. После завершения сборки и программирования мною было проведено тестирование. Проверялись основные функции: измерение уровня наполненности, корректная передача данных на веб-сайт, скорость обновления

информации. Когда все функции стали работать корректно, создание продукта было завершено.

По итогу своей работы я получила исправно работающую урну с ультразвуковым датчиком, с помощью которой можно отслеживать уровень мусора в баке. Этот проект может помочь жителям городов, так как они перестанут сталкиваться с проблемой переполненности урн. Мусорная корзина с датчиком наполняемости — это не просто устройство, а символ нашей ответственности за окружающую среду. Я надеюсь, что такой проект станет началом более широких инициатив по улучшению экологии и управления отходами в наших городах.

1. Брякин, А. Л. Двухкоординатный датчик положения [Текст] / А. Л. Брякин, С. В. Кочкин, В. В. Кожевников // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – №4 (20). – СС. 225-236
2. Жмудь, В. А. Ультразвуковой датчик измерения расстояния HC-SR04 [Текст] / В. А. Жмудь, К. А. Кузнецов, Н. О. Кондратьев, В. Г. Трубин, Л. В. Дмитров. // Автоматика и программная инженерия. ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия. – 2017. – СС. 18-26
3. Иго Т. Arduino, датчики и сети для связи устройств [Текст] / Т. Иго -СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – СС. 69-80
4. Меньщиков Ю. Arduino на пальцах [Текст] / Ю. Меньщиков – Минск, 2017.
5. Нечкин А. Умная урна как предмет экологических совершенствований [Текст] / А. Нечкин – Верхняя Салда, 2024.
6. Обеднин, А. А. Современные отечественные специализированные микросхемы для датчиков положения [Текст] / А. А. Обеднин, Г. В. Прокофьев, В. Г. Стахин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2015. – СС. 200-211
7. Умные урны, их преимущества и отличия от стандартных. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://втораяиндустриализация.рф/umnyie-urnyi/. – Дата обращения: 15.12.2024.

СОЗДАНИЕ САЙТА ТУРБАЗЫ НА ЯЗЫКЕ PYTHON

Балакин Артём, Браев Денис, Вотинцев Артём
МАОУ Лицей ИГУ г. Иркутска
balartwu@gmail.com

Озеро Байкал – жемчужина Иркутской области и центр притяжение тысяч туристов. Типичным местом размещения туристов являются турбазы, десятками расположившиеся на берегу Байкала. Однако редкие из них обладают собственным современным сайтом, который позволил бы привлечь к турбазе внимание не только заядлых туристов и тех, кому турбаза была рекомендована заядлыми туристами, но и пользователей интернета.

Наша команда взялась решить эту проблему. Мы приняли решение создать сайт для вымышленной турбазы «Тёплый огонёк», обладающий всем необходимым для сайта турбазы функционалом. Ключевыми для сайта были выделены следующие функции:

- демонстрация фотографий территории турбазы и номеров;
- доступный пользователю список номеров;
- бронирование конкретного номера на конкретные даты прямо на сайте;
- показ всей контактной информации;
- проверка и подтверждение/отмена оставленной пользователем брони со стороны администратора.

Намеченный функционал стал для нас вызовом. Для его реализации мы используем решения на основе Python.

Основой стал фреймворк FastAPI. Благодаря простоте реализации программного кода и хорошей производительности, сайт получилось сделать быстро и при этом не в ущерб функционалу. Для хранения баз данных мы использовали SQLite, известный своей безопасностью, малым объёмом занимаемого места, а также универсальностью для встраивания, что позволило хранить все необходимые данные о бронировании в одном файле на стороне сервера.

Мы надеемся и планируем доработать наш сайт, возможно, предложить его конечному потребителю – турбазе.

1 https://baikalw.ru/
2 https://www.baikalia.com/
3 https://baikalraduga.ru/
4 https://chara-baikal.ru/
5 https://timeweb.cloud/tutorials/python/ustanovka-sajta-na-fastapi-na-vds
6 https://stepik.org/course/Быстрый-старт-в-FastAPI-Python-179694/
7 https://metanit.com/python/fastapi/2.3.php
8 https://fastapi.tiangolo.com/
9 https://codelab.pro/podrobnyj-gajd-po-deployu-fastapi-na-servere/?ysclid=mggr75djuq662201924
10 https://habr.com/ru/articles/820093/
11 https://www.schoolsw3.com/exercises/index.php

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ФИРМЫ НА РЫНКЕ ЦЕННЫХ БУМАГ

М. В. Башкова
МБОУ «Лицей №2» г. Братска
22062008masha@gmail.com

Научный руководитель: С. П. Сорокин, Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН

В данном исследовании рассматривается дискретный аналог модели поведения фирмы на рынке ценных бумаг из книги [1, параграфы 5.2; 2, 3], полученный дискретизацией дифференциальных уравнений с помощью прямого метода Эйлера.

В ходе работы предложены решения задачи, целью которой является максимизация стоимости компании, которая определяется как текущая стоимость будущих дивидендов, начисляемых по акциям, находящимся в обращении на момент начала отсчёта.

Динамическое уравнение и целевая функция задачи оптимального управления:

$$x(t_{k+1}) = x(t_k) + h\big[r\big(cu(t_k) + v(t_k)\big)x(t_k)\big], k\epsilon\{0, 1, \dots, N\}\ x(0) = x_0;$$

$$y(u, v) = \sum_{t=t_0}^{t_N}[1 - v(t) - u(t)]x(t) \to max,$$

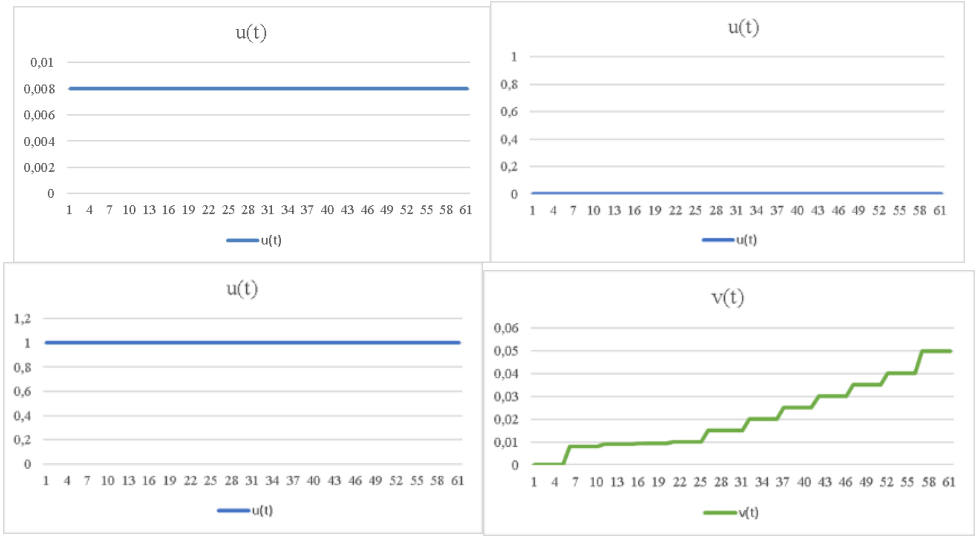
где $x(t)$ – прибыль фирмы в момент времени t (текущая прибыль); $y(t)$ – чистая приведенная величина потока дивидендов первоначальных акционеров в момент времени t; h – небольшой промежуток времени; r – норма отдачи инвестиций (норма прибыли); c – доля внешних инвестиций, остающихся после вычета из них издержек, связанных с выпуском дополнительных акций; $u(t)$ – норма внешнего финансирования; $v(t)$ – норма внутреннего финансирования.

Для простоты предполагаем, что дисконтирующий множитель отсутствует.

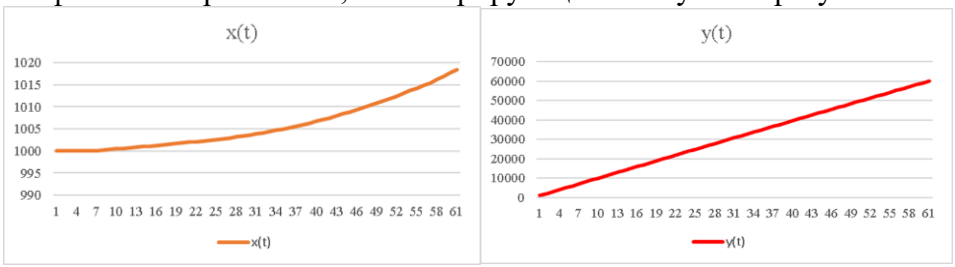
Дальше проводится серия численных экспериментов, в которых рассматриваются некоторые различные сценарии выбора управлений и сравниваются между собой. Приведем некоторые из них:

Эксперимент 1:

Предполагается «заморозить» управление u(t) и рассмотреть его влияние на конечный результат, при этом значения v(t) остаются неизменными:



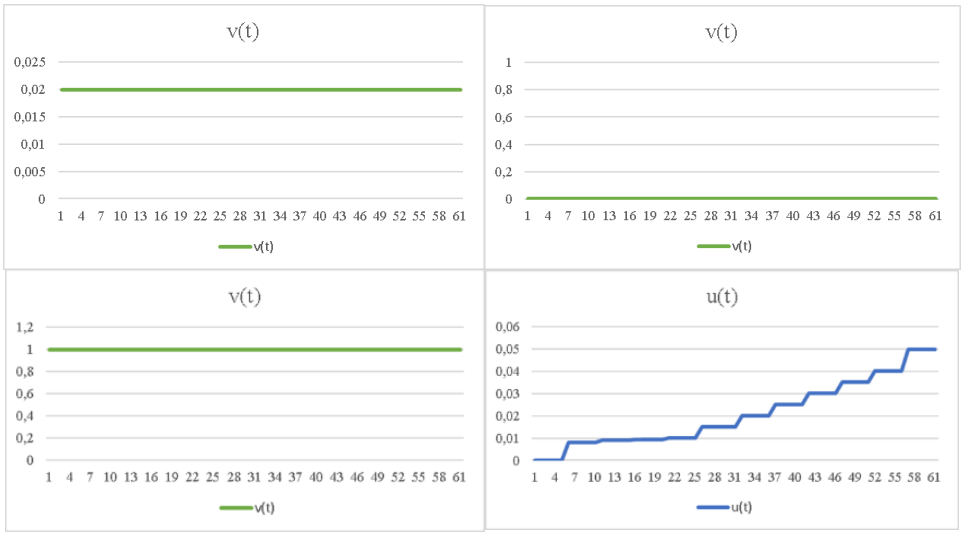
Графики фазовых переменных, иллюстрирующих наилучший результат:



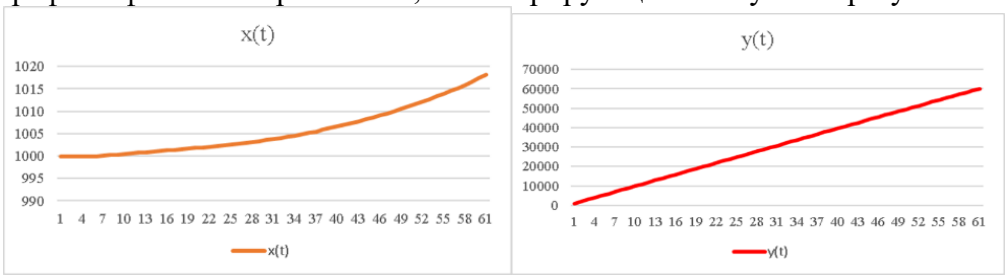
Вывод: при одинаковом управлении v(t) фирме следует минимизировать u(t), чтобы сократить дополнительные расходы, такие как: проценты по займам или дивиденды, и снизить общие финансовые затраты.

Эксперимент 2:

В этом опыте предполагается «заморозить» управление v(t) и рассмотреть его влияние на конечный результат, при этом значения u(t) остаются неизменными для всех примеров:



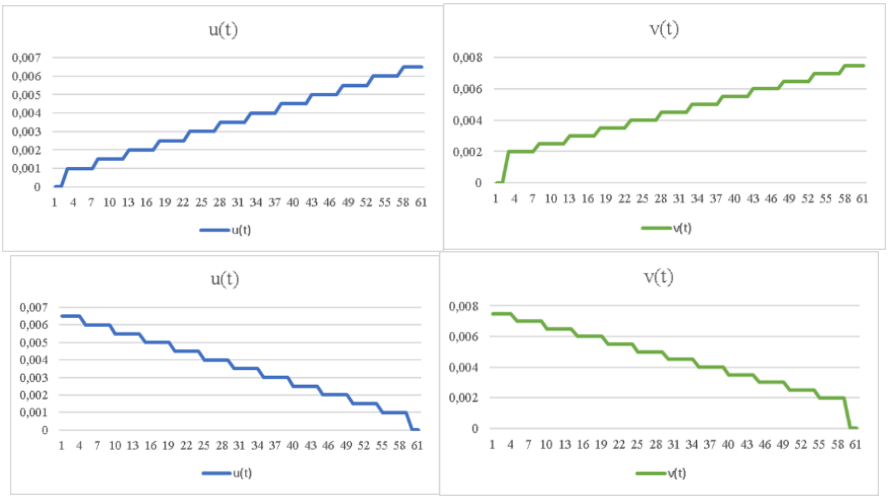
Графики фазовых переменных, иллюстрирующих наилучший результат:



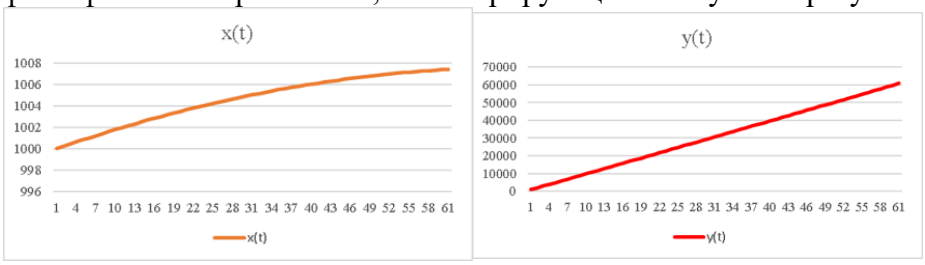
Вывод: при одинаковом управлении u(t) фирме следует минимизировать v(t), чтобы сохранить больше ликвидных средств для покрытия обязательств и инвестиций.

Эксперимент 3:

Рассмотрим примеры, в которых будет использоваться сразу два управления. В первом мы увидим пошаговое увеличение u(t) и v(t), а во втором – пошаговое уменьшение этих управлений:



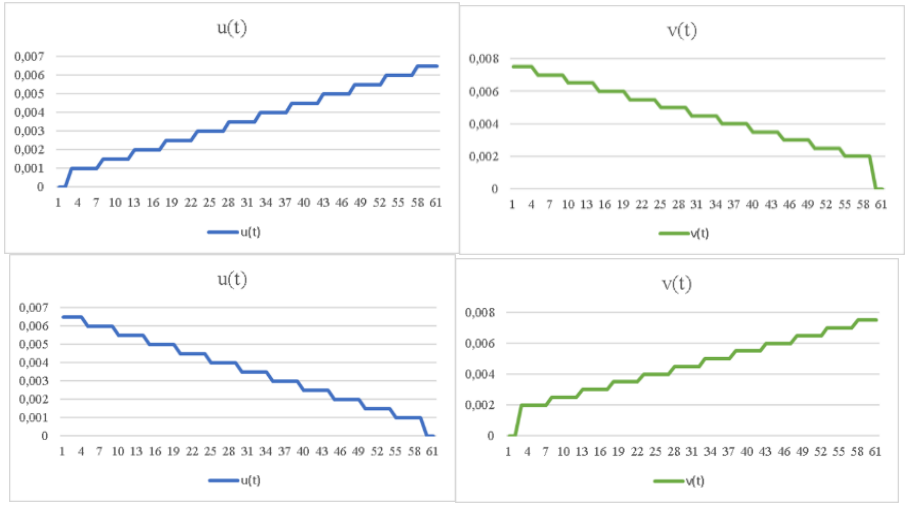
Графики фазовых переменных, иллюстрирующих наилучший результат:



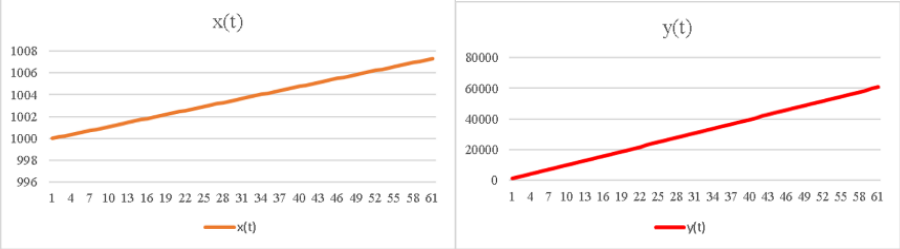
Вывод: оптимальное решение – постепенное снижение обоих управляющих параметров. Это минимизирует финансовые риски, связанные с увеличение долгов и зависимости от внешних источников капитала, обеспечивая устойчивость компании к изменениям рынка.

Эксперимент 4:

Здесь мы рассмотрим также примеры, в которых будет использоваться сразу два управления. В первом примере будем наблюдать, как параметр u(t) пошагово увеличивается, а параметр v(t) пошагово снижается. А во втором примере ситуация противоположна:



Графики фазовых переменных, иллюстрирующих наилучший результат:



Вывод: оптимальное решение – постепенное увеличение u(t) и снижение v(t). Это позволяет удерживать больше средств для нужд и расходов, делая бизнес гибким и сигнализируя рынку о возможностях роста, что может привлечь инвесторов и повысить интрес к компании.

В ходе данного исследования была предложена упрощенная математическая модель инвестиций и дивидендной политики фирмы, а также рассмотрена возможность использования теории оптимального управления при решении задач с выбором наилучшей стратегии ведения финансовой деятельности компании.

В дальнейшем возможно усложнение данной математической модели за счет добавления новых параметров, что позволит глубже анализировать и прогнозировать поведение фирмы, а также поможет принимать более обоснованные решения и стратегически планировать будущие действия.

1. Sethi, Suresh P. Optimal Control Theory: Applications to Management Science and Economics [Text] / Suresh P. Sethi, Gerald L. Thompson. – [S. l.] : Springer, 2000. — P. 506.
2. Дыхта В.А. Модели оптимального управления в макро и микроэкономике [Текст] : Учеб. Пособие / В. А. Дыхта, Н. В. Деренко. – Иркутск: Иркут. гос. экон. академия, 2002. – 180 с.
3. Дыхта В.А. Динамические модели в экономике : учеб. пос. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2015. – 194 с.

КАРМАННЫЙ ИНЖЕНЕР

Болонина Ксения
МБОУ «Лицей № 2» г. Братска

Проблема: ООО «Транснефть-Восток» – высокотехнологичное и наукоемкое предприятие, требующее оперативного применения обширных научно-технических знаний и навыков. Зачастую требуется тратить время на обращение к различной справочной и технической литературе.

Цель проекта: создать «Карманного инженера», содержащего: справочник часто используемых физических величин и измерений; калькулятор перевода одних физических величин в другие; калькулятор подсчёта объёмных и линейных показателей выполняемых работ по заданным значениям: объём разрабатываемого котлована исходя из глубины и склонов откосов, масса перевозимых материалов исходя из объёмов и плоскости, площадь окрашиваемых поверхностей (изолируемых поверхностей), и прочее.

Гипотеза: Если мы объединим все формулы, которые нужны для работы инженера на предприятии, а также справочную информацию в одном сайте, то сможем продумать удобный интерфейс для справочника.

Задачи:

1) изучить теоретические основы для создания приложения «Карманный инженер»;
2) найти необходимые формулы для проведения расчётов с использованием приложения;
3) создать приложение, используя всю полученную информацию;
4) апробировать «Карманный инженер» на практике.

Методы исследования:

1) анализ и синтез теоретических основ для создания приложения;
2) изучение и обобщение необходимых формул для проведения расчётов с использованием приложения;
3) провести эксперимент по работе «Карманного инженера».

Целевая аудитория: инженеры компании ООО «Транснефть-Восток».

Итоговый продукт: приложение «Карманный инженер».

Краткие выводы:

1) изучили теоретические основы для создания приложения;
2) нашли необходимые формулы для проведения расчётов с использованием приложения;
3) создали сайт, используя всю полученную информацию;
4) апробировали “Карманного инженера” на практике;
5) предоставили готовый продукт ООО “Транснефть-Восток”.

Продукт проекта: Карманный инженер

1. Земенков, Ю. Д. Справочник инженера по эксплутации нефтегазопроводов и продуктопроводов [Текст] / А. Н. Гульков - Мск.: “Инфра-Инженерия”, 2006. - С. 900.
2. Статья “Обозначения единиц физических величин” [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://studfile.net/preview/7751277/page:7/ - Дата обращения: 10.11.2024.
3. А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина и др.; «Физические величины» [Текст] / И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова - Мск.: “Энергоатомиздат”, 1991, - С. 1234.
4. Нордлинг, Карл. Справочник по физике [Текст] : для ученого и инженера / Карл Нордлинг, Джонни Остерман ; [пер. с англ. и науч. ред. Александра Бармасова]. — Санкт-Петербург : “БХВ-Петербург”, 2011. — С. 522.

5. МаркГрат, Майк. Excel VBA. Стань продвинутым пользователем за неделю [Текст] / Майк МаркГрат - Мск.: “Бомбора”, 2022, - С. 240.
6. Калиниченко, А. В. Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике (Справочник инженера по КИПиА учебное пособие) [Текст] / А. В. Калиниченко, Н. В. Уваров, В. В. Дойников. — 4-е изд., испр. и доп — Мск.: “Инфра-Инженерия”, 2020. - С. 576.

МАЯТНИК МАКСВЕЛЛА: НАХОЖДЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ

В. М. Волков, О. А. Ларюнин, Н. А. Астраханцева
МАОУ Лицей ИГУ г. Иркутска,
ИСЗФ СО РАН
ivb1362@gmail.com, laroleg@inbox.ru, natali140256@mail.ru

Цель: изучить устройство и принцип действия маятника Максвелла, провести расчёты момента инерции.

Задачи: Проанализировать материал по данной теме, изучить строение маятника Максвелла, определить зависимость момента инерции от других величин, провести эксперимент, найти момент инерции, кинетическую энергию, ускорение центра маятника

Актуальность: Маятник Максвелла совершает поступательное, вращательное и колебательное движения. Его часто используют для практических работ. Навык работы с маятником Максвелла может помочь при решении задач на определение ускорения движения, амплитуду колебаний, жёсткость троса. Подобные задачи встречаются при строительстве, проектировании, сложных вычислениях.

Маятник Максвелла представляет собой массивный диск, ось которого подвешена на двух накрученных на нее нитях. Каждый цикл движения маятника Максвелла состоит из четырех стадий: спуска, рывка (удара) и подъема вверх. Маятник Максвелла совершает сложное колебательное движение, вращательное, поступательное движение. Из-за комбинации этих движений, движение маятника представляет определенный интерес.

$E_k = mV^2/2 = (\omega R)^2 m/2 = \omega^2 mR^2/2$ Угловую скорость легко определить, для всех точек тела она одинакова. $I = mR^2$ $E_k = I\omega^2/2$ Для круговой петли радиусом R и массой m момент инерции равен $I = \Sigma \Delta m R^2 = R^2 \sum \Delta m = mR^2$

Рассмотрим стержень массой m, длинной L, вращающегося вокруг одного из своих концов. Элемент этого стержня имеет массу Δm и длину Δl, расположен на расстоянии l от оси вращения. $\Delta m = m\Delta l/L$; $I = \Sigma \Delta m l^2 = \Sigma l^2 m \Delta l/L = (m/L)\Sigma l^2 \Delta l$; $I = (m/L)\int_0^L l^2 \delta l = \frac{ml^3}{3L}|_0^L = (L^3/3 - 0^3/3)m/L = mL^2/3$

Тонкий диск массой m, радиусом R разобьём на n тонких колец радиусом r и массой Δm. Рассчитаем момент инерции (ΔI) для одного такого кольца. $\Delta m = 2mr\Delta r/R^2$; $\Delta I = \Delta m r^2 = 2mr^3 \Delta r/R^2$; $I = \Sigma \Delta I = \Sigma 2mr^3 dr/R^2 = \int_0^R 2mr^3 \Delta r/R^2 = 2m/R^2 \int_0^R r^3 dr = (2m/R^2)r^4/4\ |_0^r = (R^4/4 - 0^4/4)2m/R^2 = mR^2/2$

Кинетическую энергию диска найти сложнее, чем энергию стержня или замкнутой петли. Представим диск в виде множества колец. Кинетическая энергия одного кольца, если Δr – ширина кольца, b – толщина кольца, ρ – плотность кольца, ω – угловая скорость, равна $\Delta E_k = (2\pi rb\Delta r\rho)\omega^2 R^2/2$. Кинетическая энергия всего диска приближённо равна сумме кинетических энергий отдельных колец. $E_k \approx \Sigma \Delta E_k$ Перейдём к пределу.

$E_k = \lim \Sigma \Delta E_k = \int_0^R (2\pi rb\delta x\rho)\omega^2 R^2 dr/2 = \pi b\rho\omega^2 R^4/4 = (\pi bR^2\rho)\omega^2 R^2/4 = m\omega^2 R^2/4$ Где $\pi bR^2\rho = m$(массе диска).

Определим ускорение для обруча. Обозначим радиус обруча через R, а радиус оси – через r. Рассмотрим маятник в тот момент, когда он опустится на расстояние h. V_c – скорость движения центра диска. $V_c = at = \omega r$; $h = at^2/2$

Согласно закону сохранения энергии. $I = mR^2$; $mgh = (mV_c^2/2) + (I\omega^2/2)$; $mgh = (mV_c/2) + (mVc^2R^2/r^2)$; $gh = (v^2/2)(1 + R^2/r^2)$; $gat^2/2 = (a^2t^2/2)(1 + R^2/r^2)$; $g = a(1 + R^2/r^2)$; $a = g/(1 + R^2/r^2)$ Поскольку $R/r >> 1$ выражение можно упростить $a \approx g(r/R)^2$.

Для проведения эксперимента мною был использован Маятник Максвелла. Груз маятника сделан из стали, плотность стали ρ равна 7800 кг/м³. Вычислим среднее время перемещения маятника из высшей точки в низшую.

R, м	r, м	L, м	l, м	h, м	t, с
					2,18
					2,31
					2,5
					2,11
0,061	0,005	0,018	0,17	0,29	2,25

$$t(\text{среднее}) = (t_1+t_2+t_3+t_4+t_5)/5 = (2{,}18 + 2{,}31 + 2{,}5 + 2{,}11 + 2{,}25)/5 = 2{,}27(\text{с})$$

$$S = \pi R^2; \quad m = pV = pLS; \quad V = \omega R = 2\pi R/t$$

$$\omega = 2\pi/t = 2 \cdot 3{,}14/2{,}27 = 2{,}77(\text{рад/с})$$

$$m(\text{масса стержня}) = \pi r^2 lp = 3{,}14 \cdot 0{,}005^2 \cdot 0{,}170 \cdot 7800 = 0{,}104(\text{кг})$$

$$M(\text{масса диска}) = \pi(R^2 - r^2)Lp = 3{,}14 \cdot (0{,}061^2 - 0{,}005^2) \cdot 0{,}018 \cdot 7800 = 1{,}631(\text{кг})$$

Масса стержня во много раз меньше массы диска. Ей можно пренебречь. Также ширина диска во много раз меньше его радиуса. Можно для расчётов воспользоваться законами для тонкого диска.

$$I = M(R^2 - r^2)/2 = 1{,}631(0{,}061^2 - 0{,}005^2)/2 = 0{,}006(\text{кг/м}^2)$$

$$E_k = I\omega^2/2 = 0{,}006 \cdot 2{,}77/2 = 0{,}008(\text{Дж})$$

$$a = g/(r/R)^2 = 10 \cdot (0{,}005/0{,}061)^2 = 0{,}067(\text{м/с}^2)$$

Для сравнения точности результатов вычислений выведем ускорение из формулы $h = at^2/2$. $a = 2h/t^2 = 2 \cdot 0{,}29/0{,}27^2 = 0{,}11(\text{м/с}^2)$ Это значение отличается от полученного, немного больше. При проведении вычислений момента инерции маятник рассматривался, как тонкий диск почти не имеющий ширины. Это привело к небольшому расхождению значений.

В результате исследования были изучены строение и принцип действия маятника Максвелла, описаны законы движения маятника, определена зависимость момента инерции от других величин. Далее был проведён эксперимент, результаты эксперимента были занесены в таблицу. По результатам были определён момент инерции, кинетическая энергия, модуль ускорения поступательного движения.

1. Гесс Д. З, Юсупов А. Р., Кудинов И. В., Измаилов Р. Н. Педагогические инструменты формирования содержания электронно-образовательной среды вуза на примере дисциплины «Физика» - Современное педагогическое образование. 2024.
2. Виноградов С. Н., Крукович Н. П. Проверка теоремы Кёнига экспериментальным путем - Вестник молодежной науки. 2023. - 39 с.
3. Гулин В. М., Огнева О. Ф. Виртуальные физические лаборатории – актуальный инструмент обучения в современных условиях - Primo aspectu. 2022. - 50 с.
4. Иванов В. К. Физика. Механика. Колебания: учебное Пособие – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2021. - 224 с.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3 томах — СПб.: Лань, 2021. — 436 с.
6. Очилов Л. И., Арабов Ж. О., Ашурова У. Д. Измерение преобразования потенциальной энергии в поступательную и вращательную энергию с помощью колеса Максвелла - Вестник науки и образования. 2020. - 96 с.

7. Гольдварг Т. Б., Петрович Э. В., Сумьянова Е. В. Методика преподавания лабораторного практикума общей физики в высшей школе - Современное педагогическое образование. 2020.
8. Драчёв К. А., Губин С. В. Виртуальные лабораторные работы по физике для студентов дистанционной формы обучения - The Scientific Heritage. 2020. - 44 с.
9. Нявро В. Ф., Толстик А. М. Маятник Максвелла. Методические указания для выполнения лабораторной работы. – Издательство ТГУ. 2014.
10. Иванов В. Н., Туровец А. Г. Механика. Молекулярная физика. Методические указания к лабораторным работам. - Издательство ОмГТУ. 2013.
11. Кондрачёв В. В., Бобученко Д. С. Особенности движения маятника Максвелла. – Издательство БНТУ. 2012.
12. Боровой А., Климов Ю. Маятник Максвелла – Журнал «Квант». 1981.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ С ПАРАМЕТРОМ

Мясников Герман
МБОУ «СОШ № 37» им. Королькова А.М. г. Ангарска

Раздел «Системы счисления» в школьном курсе информатики представлен традиционными системами счисления с основанием n: двоичная (n=2), восьмеричная (n=8) и шестнадцатеричная (n=8) [1,2]. В школьном курсе профильного изучения математики и информатики не изучают системы счисления, к которым относится факториальная система счисления с базисом $(i+c)!$ (i =1,..,m; m – номер старшего из разрядов в записи числа) и дополнительным параметром c [3].

Для такой факториальной системы счисления авторами не обнаружена в общедоступной литературе схема перевода из десятичной системы в такую факториальную систему счисления.

Рассмотрим пример перевода числа из факториальной системы счисления в десятичную систему счисления при c=1:

$$1034_{(i+1)!}=1\cdot(4+1)!+0\cdot(3+1)!+3\cdot(2+1)!+4\cdot(1+1)!=146_{10},\ B_{10}=146_{10}. \quad (1)$$

Обратный перевод для (1):

$$146/3=48(2);\ 48/4=12(0);\ 12/5=2(2);\ 2/6=0(2);\ \text{результат: } C_{(i+1)!}=2202_{(i+1)!}. \quad (2)$$

$$146/(2+c)=48(2);\ 48/(3+c)=12(0);\ 12/(4+c)=2(2);\ 2/(5+c)=0(2). \quad (3)$$

После уменьшения числа $2202_{(i+1)!}$ в 2 раза его разложение приведёт к числу 146_{10}:

$$1101_{(i+1)!}=1\cdot(4+1)!+1\cdot(3+1)!+0\cdot(2+1)!+1\cdot(1+1)!=146_{10},\ B_{10}=146_{10}. \quad (4)$$

В настоящей работе с помощью численных экспериментов в программе, реализованной на языке Python, установлена зависимость от параметра c, которая позволяет сохранить десятичное число при представлении его во факториальной системе счисления:

$$A_{(i+c)!}\rightarrow B_{10}\rightarrow C_{(i+c)!}\rightarrow (i+c)!\cdot B_{10}, \quad (5)$$

где $A_{(i+c)!}$, $C_{(i+c)!}$ – числа в исследуемой факториальной системе счисления; B_{10} – число в десятичной системе счисления. Выражение (5) показывает, что одному числу B_{10} соответствует два разных числа $A_{(i+c)!}$, $C_{(i+c)!}$.

Особенность применения рассматриваемой факториальной системы счисления является то, что при переводе в эту факториальную систему счисления заранее нужно учесть, сколько может потребоваться дополнительных буквенных символов для кодирования в (2) остатков от деления при $(i+c)>10$.

1. Фомин С.В. Системы счисления. М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1980.
2. Андреева Е.В., Л.Л. Босова, И.Н. Фалина. Математические основы информатики. Элективный курс. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.
3. Еремин Е.А., Поляков К.Ю. Насколько правильно мы рассказываем школьникам про количество цифр в разных системах счисления? // Информатика в школе. 2020. № 6. С. 8-18.

ЗАЩИТНАЯ НАОКОННАЯ СЕТЬ С ДАТЧИКОМ ДВИЖЕНИЯ

М. А. Ерохина
МБОУ «Лицей №2» г. Братска
2erokhina.mariya0@mail.ru

Чем более развита городская жизнь, тем больше внимания нужно уделять безопасным условиям жизни детей. Одной из возможных опасностей, свойственных городам, является незащищенность оконных проемов от длительных надавливающих воздействий. Этим обусловлена актуальность моего проекта. Социальная значимость данного проекта заключается в основанном на характеристиках и свойствах продукта спокойствии родителей и опекунов за сохранность жизни своего ребенка вне зависимости от их присутствия или отсутствия.

Ежегодно, по данным МЧС, около 1000 детей выпадает из окон квартир, принимая москитную сеть за защитную, и опираясь на нее. Это и является проблемой данного проекта.

Цель проекта: создать защитную наоконную сеть с датчиком движения, выдерживающую натиск.

Задачи проекта:

1. Изучить недостатки существующих аналогов, материалы для сети, типы датчиков движения.
2. Произвести подбор материала для сети, обосновать свой выбор.
3. Спроектировать конструкцию рамы, опираясь на измерения, в формате 3d модели.
4. Собрать конструкцию воедино, установить датчик движения.
5. Провести апробацию конструкции в безопасных условиях, сделать выводы.

Методы, которые использовались при разработке: анализ, сравнение.

По моему мнению, для создания безопасного наоконного барьера имеется основная необходимая теоретическая и практическая информация, но серьезность этого вопроса отодвигается на второй план из-за уверенности родителей в своей внимательности в уходе и присмотре за детьми.

В ходе проекта, в теоретической части был проведен социальный опрос, позволяющий выявить необходимость продукта проекта у соответствующей аудитории. Проанализированы существующие аналоги, определены их недостатки. В практической части был смоделирован трехмерный макет сети, основанный на реальных размерах, применен особый тип крепежа сети в раму. Также после сборки цепи была проведена апробация продукта в безопасных условиях.

Продукт данного проекта обладает большой практической значимостью в современном мире и является очень полезным атрибутом в повседневной жизни. Конструкция поможет исключить риск выпадения ребенка или питомца из окна, за счет особой прочности материалов и самой модели барьера.

1. Виды полипропилена и их эксплуатационные свойства / Малькова А. Е., Михайличенко Е. С.// Международный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ» №5(50) Т.4 / Тольятти: Периодическое электронное научное издание, 2022. университет – С. 210–212.
2. Загорулько М.С., Усиевич Е.М., Валявин С.Ю. Металлические крепежные элементы // Инновации в науке: научный журнал. – № 6(82). – Новосибирск., Изд. АНС «СибАК», 2018. – С. 52–55.

3. М.А. Мельникова. Полимерные материалы: свойства, практическое применение. // Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2013. С. 13.
4. Материаловедение [Электронный ресурс]: электрон. образовательный контент по дисциплине Материаловедение / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. Ю. В. Никитина. - Электрон. текстовые и граф. дан. - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM). – С. 25–31.
5. Сравнение свойств нейлонов [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ecoplast.ru/support/poleznaya_informaciya/text/text-nylon (дата обращения: 25.09.2024).
6. Текстильное материаловедение [Электронный ресурс]: электрон. Образовательный контент по дисциплине Текстильное материаловедение / Казанский национальный исследовательский технологический университет – С. 397–400.

БЕСШОВНЫЙ НАВИГАТОР: РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ В ЗДАНИЯХ И НА ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ

Л. А. Ефремов, Е. А. Олешевец, Р. А. Иванов
МБОУ «Лицей №2» г. Братска
lev3f.efremov@gmail.com

Проект «Бесшовный навигатор» направлен на создание инновационной системы навигации, которая обеспечивает плавный и непрерывный переход между зданием и прилегающей к нему территорией. Основной целью разработки является снижение времени на передвижение и оптимизация маршрутов для пользователей, учитывающих совмещение различных видов пеших маршрутов.

В рамках проекта разрабатывается мобильное приложение с интеграцией картографических сервисов, которое позволит пользователям легко и быстро находить наиболее удобные маршруты. Идея по созданию проекта появилась год назад, когда авторы находились в городе Москва на конференции «Шаг в будущее». Во время прибывания на разных площадках в университетах, авторам не хватало четкого визуализированного плана здания для удобной ориентации и быстрого нахождения нужной аудитории.

Актуальность проекта обусловлена растущими потребностями пользователей в удобных, интуитивно понятных и высокоточных навигационных решениях. В условиях современного мира, где динамика жизни постоянно ускоряется, эффективная навигация становится важнейшей частью повседневной деятельности людей.

В ходе поэтапной работы над проектом был получен и обработан план МБОУ «Лицей №2», который стал основой создания сервиса к приложению; изучены и приобретены виды необходимых датчиков; началось изучение и создание структуры платформы программно-аппаратного комплекса.

Техническая реализация включает использование технологий GNSS (GPS/ГЛОНАСС), гироскопических датчиков, акселерометров, Bluetooth и Wi-Fi модулей для позиционирования внутри помещений. Для разработки применяются Java, Spring Framework, 2GIS Android SDK, QGIS, Redis, системы мониторинга Prometheus/Grafana.

Текущие результаты: в разработке находится основной интерфейс приложения, полностью откартографирован план здания школы, начата работа над алгоритмом прокладывания маршрутов внутри помещений, реализована основная логика серверной части.

Перспективы проекта включают интеграцию датчиков в систему для точного позиционирования внутри зданий по этажам и близь прилегающих территорий, доработку алгоритмов маршрутизации с учетом внутренних особенностей помещений, проведение тестирования приложения на реальных данных.

1. Рольф А. Йердше. Навигация успеха в цифровую эпоху: сила бесшовного подключения.
2. Липкин И.А. Спутниковые навигационные системы. М.: Вузовская книга, 2001.
3. Android SDK // 2GIS Documentation.
4. Информационные ресурсы по indoor-навигации (RUTUBE).

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВОВ Ti50Ni25Cu25 С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

М. В. Зимин
Университетский лицей №1511 Предуниверситария НИЯУ МИФИ
Научный руководитель: К. А. Бородако
«Сверхпроводящие энергетические системы» института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ

В настоящий момент перед материаловедением стоит задача по разработке и исследованию новых материалов, которые обладают высокими эксплуатационными свойствами. Одним из важных направлений данной области являются «умные» материалы, в том числе с эффектом памяти формы (ЭПФ) [1-4]. Ведущим вектором использования материалов с ЭПФ является использование их в микро- и наномеханических устройствах и микроэлектромеханических системах (МЭМС), применяемых в современных областях исследований. В связи с крайне малыми размерами таких устройств для такого применения необходимы тонкомерные сплавы с ЭПФ. Данные сплавы могут быть получены в виде тонкой ленты с помощью метода сверхбыстрой закалки из расплава [5, 6]. Данный метод позволяет получить ленту в аморфном или аморфно-кристаллическом фазовом состоянии [7]. Аморфная лента не обладает ЭПФ, и для придания этого свойства необходимо её кристаллизовать. Наиболее распространенным методом кристаллизации является изотермический отжиг в печи. В то же время существует способ кристаллизации с помощью электроимпульсной обработки (ЭИО) – за счет джоулева нагрева при пропускании через ленту тока. В ряде работ [8, 9] исследовано влияние электроимпульсной кристаллизации на механические и структурные свойства сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ ат. %. Показано, что ЭИО приводит к формированию текстурированных столбчатых кристаллов у поверхности и отдельных или сгруппированных крупных кристаллов в объеме, что может привести к изменению физико-механических характеристик. Однако в работах недостаточно изучено влияние ЭИО на термомеханические свойства сплава TiNiCu, следовательно, целью данной работы является исследование влияния ЭИО на термомеханические свойства образцов сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ с ЭПФ.

В качестве объекта исследования была выбрана тонкая лента из сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$, полученная в аморфном состоянии методом сверхбыстрой закалки из расплава. Кристаллизация образцов лент с целью придания им эффекта памяти формы осуществлялась с помощью ЭИО различной длительности, в интервале от 3 до 13 мс. Процесс проводился до достижения степеней кристаллизации, варьирующихся от начальной стадии структурных преобразований до состояния полной перекристаллизации. Мониторинг степени кристаллизации выполнялся с использованием осциллографической методики, основанной на регистрации изменения падения напряжения на образце, обусловленного переходом материала из аморфного состояния в кристаллическое и сопутствующим этому изменением электрического сопротивления. Исследованию подверглись образцы, характеризующиеся тремя типами структурных состояний: с неполным изменением сопротивления за время импульса; с полным изменением сопротивления в течение всего периода ЭИО; а также с полным изменением сопротивления за промежуток времени, составляющий половину длительности ЭИО.

Для измерения термомеханических свойств была использована лабораторная установка, состоящая из термопары, работающей на основе эффекта Зеебека, и датчика перемещения, функционирующего по принципу магнитной индукции. Измерения осуществлялись с помощью цифрового осциллографа (АЦП-ЦАП).

В ходе исследования термомеханических характеристик получены зависимости деформации образца от температуры при постоянной нагрузке 100 МПа. По графикам рассчитана величина ЭПФ, его гистерезис, а также температуры начала и конца прямого (M_s, M_f) и обратного (A_s, A_f) мартенситных превращений. Было установлено, что уменьшение длительности ЭИО и приближение к состоянию полной кристаллизации приводит к увеличению ЭПФ, к сужению температурного гистерезиса и увеличению температур мартенситных превращений.

1. Shelyakov A. V. et al. Melt-spun thin ribbons of shape memory TiNiCu alloy for micromechanical applications //International Journal of Smart and Nano Materials. – 2011. – Т. 2. – №. 2. – С. 68-77.
2. Shelyakov A. et al. Development of micromechanical device on the base of two-way shape memory alloy Ribbon //Acta Phys Pol. – 2018. – Т. 134. – №. 3. – С. 708-13.
3. Shelyakov A. et al. Design of microgrippers based on amorphous-crystalline TiNiCu alloy with two-way shape memory //Journal of Micro-Bio Robotics. – 2020. – Т. 16. – С. 43-51.
4. Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M. A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // Materials and Designs, 56. 2014. pp.1078-1113.
5. Шеляков А.В. и др. Формирование обратимого эффекта памяти формы в сплаве TiNiCu методом спиннингования // Известия РАН. Серия Физическая, 2015. 79 (9). с. 1281–1287
6. Shelyakov A. V. et al. Melt-spun thin ribbons of shape memory TiNiCu alloy for micromechanical applications //International Journal of Smart and Nano Materials. – 2011. – Т. 2. – №. 2. – С. 68-77.
7. Pushin V. et al Microstructure and phase transition in rapidly solidified Ti50Ni50-xCux shape memory alloys // Abstract Bull 1996 Fall Meeting of Materials Research Society. 1996.
8. Sitnikov N. N. et al. The microstructure of rapidly quenched TiNiCu ribbons crystallized by isothermal and electropulse treatments //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 770. – №. 1. – С. 012088.
9. Khabibullina I. A. et al. Investigation of the features of the formation of the crystal structure in rapidly quenched amorphous-crystalline and amorphous ribbons of the TiNiCu alloy by isothermal and electropulse treatment //Applied Solid State Chemistry. – 2019. – №. 2. – С. 46-56.

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ «ПРАКТИКА В АО «АНХК»

Калашникова Виталина, Чередниченко Анна
МАОУ Лицей ИГУ г. Иркутска

Цель проекта заключается в разработке удобного, логичного и визуально привлекательного дизайна мобильного приложения, обеспечивающего эффективное взаимодействие студентов-практикантов с АО «АНХК».

Задачи проекта:

1. Провести анализ требований заказчика и целевой аудитории.
2. Освоить инструменты проектирования интерфейсов в Figma.
3. Разработать макеты экранов с учетом логичного расположения элементов.
4. Спроектировать дизайн кнопок, полей ввода, декоративных элементов и текстовых блоков.
5. Обеспечить соответствие визуального стиля корпоративным стандартам компании.
6. Провести тестирование и доработку макетов на основе обратной связи заказчика.

Проблема: Организация производственной практики в АО «АНХК» требует значительных временных и человеческих ресурсов. Взаимодействие между студентами и компанией осуществляется преимущественно в офлайн-формате, что не всегда способствует высокой эффективности. Из-за отсутствия современных цифровых инструментов затрудняется оперативный обмен информацией, контроль выполнения заданий и получение обратной связи.

Гипотеза: Разработанный дизайн интерфейса приложения будет прост и удобен как для мобильных разработчиков, так и для пользователей (практикантов) в дальнейшем, а также будет удовлетворять требованиям заказчика.

Методы:

- Figma — графический редактор для совместного проектирования

Краткое описание работы:

Мобильное приложение «Практикант «АНХК» предназначено для организации и поддержки взаимодействия между компанией и студентами, проходящими производственные и преддипломные практики. Приложение предоставляет студентам доступ к важной информации о компании, месту проведения практики, расписанию мероприятий и перечню необходимых документов. Через приложение студенты будут получать уведомления о времени и месте инструктажей, смогут ознакомиться с контактными данными ответственных сотрудников и сдавать анкеты обратной связи по итогам практики. Для повышения вовлечённости предусмотрены элементы геймификации, которые помогут студентам успешно проходить этапы практики в интерактивной форме.

Проект представляет собой разработку дизайна мобильного приложения, предназначенного для автоматизации взаимодействия между студентами, проходящими практику, и Акционерным обществом «Ангарская нефтехимическая компания» (АО «АНХК»). Ежегодно компания принимает более 300 студентов, и организация практики требует значительных временных и человеческих ресурсов. В рамках проекта была создана визуальная концепция мобильного приложения, которая включает продуманный и удобный пользовательский интерфейс (UI), соответствующий

принципам UX-дизайна, корпоративному стилю и потребностям целевой аудитории. Разработка велась с использованием профессионального инструмента Figma.

Основные функции приложения:

- доступ к информации о компании и организационных документах, расписание встреч и инструктажей;
- система заданий и обратной связи;
- раздел вопросов и ответов;
- личный профиль пользователя;
- система достижений.

Практическая значимость проекта заключается в его реальной применимости.

Разработанный дизайн может быть использован как основа для дальнейшей мобильной разработки, что позволит компании оптимизировать процессы практики и повысить уровень удовлетворённости студентов.

ГРУЗОВОЙ ДРОН: ОТ ИДЕИ ДО ВОПЛОЩЕНИЯ

А. Ю. Мадзагирова
МБОУ «Лицей №2» г. Братска
alinamadzagirova@gmail.com

В мире логистики широко применяются беспилотные летательные аппараты для доставки коммерческих грузов, почты, медикаментов и т.д. Особое предпочтение отдается грузовым дронам − беспилотным летательным аппаратам (далее – беспилотники, БПЛА), способным перемещать груз на большие расстояния.

Тестирование беспилотных летательных аппаратов показало хорошую работоспособность дронов, работающих внутри склада для инвентаризации и охраны груза, и было высоко оценено сотрудниками Российской компании «МГЛ Метро Груп Логистикс». Во время работы с беспилотниками происходит высокая точность и скорость работы, повышение безопасности товара, снижение травмоопасности сотрудников склада, поэтому риск для человеческой жизни снижается, особенно в опасных условиях.

Идея проекта состоит в создании модели дрона, который сможет перемещать определенный груз внутри складского помещения и проводить его инвентаризацию.

Цель работы: создать модель грузового дрона и провести над ним испытания. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Сконструировать дрон на основе базового набора «Геоскан пионер».
2. Подключить к модели модуль подъема груза.
3. Написать траекторию полета, подобную настоящей во время полета дрона с объектом.
4. Провести эксперимент над моделью (полет по траектории с модулем подъема груза).
5. Выявить сильные и слабые качества модели.
6. Сделать вывод по полученной работе и выявить дальнейшие перспективы.

В соответствии с поставленными задачами на основе базового набора «Геоскан пионер» был сконструирован дрон, к которому прикреплен модуль груза. В дальнейшем была спрограммирована траектория полета, подобная работе на складе с переносом груза. Была подготовлена трасса для полета дрона. За основу трассы была взята форма обычного склада. После подготовки трассы был совершен полет. Дрон успешно справился с задачей. Благодаря экспериментам над моделью получилось доказать преимущество работы дрона с грузовым объектом, а также были выявлены недостатки.

Преимущества работы дрона:

- скорость и возможность выполнения работы в сложных условиях;
- дистанционный контакт человека с объектом;
- способность летать, маневрировать в пространстве;
- снижение риска травм, связанных с ручной переноской грузов, соответственно, безопасность для человека.

Недостатки работы дрона:

- ограниченное время работы;
- ограниченная грузоподъёмность.

Экспериментальная модель не способна перевозить большой груз, лишь объекты массой до 50 граммов, но она показывает существенные преимущества.

В ближайшем будущем планируется разработать 3D-модель настоящего беспилотника, который сможет работать в складском помещении (предприятии) для хранения грузов, в том числе, в сфере логистики.

1. Быстрый старт — документация Pioneer March update 2024 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://docs.geoscan.ru/pioneer/index.html.
2. Использование грузовых БПЛА в гуманитарных миссиях и природных катастрофах: спасение жизней и ресурсов [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.karneev.com/stati/ispolzovanie-gruzovykh-bpla-v-gumanitarnykh-missiyakh-i-prirodnykh-katastrofakh-spasenie-zhizney-i-r/
3. Матюха С. В. Беспилотные авиационные системы в грузоперевозках [Текст]/ С. В. Матюха // Транспортное дело России. – 2022. – №1. – с. 141-143.
4. МГЛ Метро Груп Логистикс запустила дроны на склад | РБК Компании [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://companies.rbc.ru/news/5rE8C4C6Wu/mgl-metro-grup-logistiks-zapustila-dronyi-na-sklad/
5. Zipline (drone delivery company) – Wikipedia VISION [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Zipline_(drone_delivery_company)
6. Quick start guide — Matplotlib 3.10.0 documentation [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://matplotlib.org/stable/users/explain/quick_start.html

ФИЗИКА ГИТАРНЫХ СТРУН

Е. А. Новокрещенных
МАОУ «Ангарский лицей №1»
natalibognov@yandex.ru

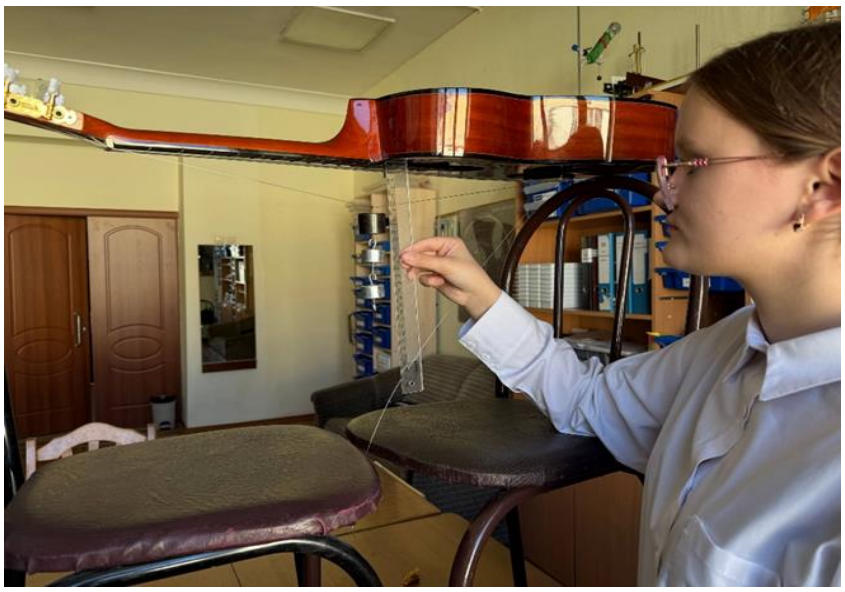
В наше время все больше людей интересуется музыкой, в том числе и игрой на гитаре. Выбранная тема имеет актуальность в кругах музыкантов, так как успех зависит не только от уровня мастерства, но и от состояния инструмента. Одной из важных составляющей гитары являются струны.

Цель проектной работы состоит в том, чтобы выявить факторы, влияющие на звучание струн гитары.

Гипотеза: Качественное звучание гитары зависит от состояния струн.

Объектом данного исследования являются классическая гитара, а предметом – струны.

Для измерения модуля Юнга у струн классической гитары были использованы: установка для закрепления гитары, штангенциркуль, три грузика массой 100 г каждый и линейка.



1. Измерение длины, высоты, диаметра струны с помощью линейки и штангенциркуля.
2. Расчет площади поперечного сечения.
3. Утяжеление струны грузиками в количестве 3 штук 100г каждый. Расчет конечной длины, используя теорему Пифагора.
4. Определение абсолютной деформации. (Для чистоты эксперимента струны были взяты одной даты выпуска и одного производителя).
5. Нахождение модуля Юнга согласно закону Гука.
6. Сравнение полученных результатов.

Измерение высоты струны под весом грузов с применением линейки:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$; другое написание формулы: $\frac{F}{A} = E\frac{\Delta L}{L0}$

$$E = \frac{F}{A} = \frac{F_x * L0}{d * \Delta L}$$

$A = \frac{nd^2}{4} = \frac{3{,}14*(0{,}008)^2}{4}$ =5,024*10^{-7} (м^2); площадь поперечного сечения струны

L_0= 0,28 м; начальная длина струны

L1= $\sqrt{0{,}28^2 + 0{,}03^2} = 0{,}282$ (м); конечная длина старой струны

L2= $\sqrt{0{,}28^2 + 0{,}05^2} = 0{,}284$ (м); конечная длина старой струны

ΔL_1= 0,282 - 0,28 = 0,002 (м); абсолютная деформация 1

ΔL_2= 0,284 – 0,28 = 0,004 (м); абсолютная деформация 2,

где F_x=F*sin α, т.к. ∠MNK=∠ABC образованы соответственно перпендикулярными сторонами.

$$\sin\alpha 1 = \frac{h1}{l1} = \frac{0.03}{0{,}282} = 0{,}106$$

$$\sin\alpha 2 = \frac{h2}{l2} = \frac{0.05}{0{,}284} = 0{,}176$$

F_{x1}= 3*0,106= 0,318 (Н)

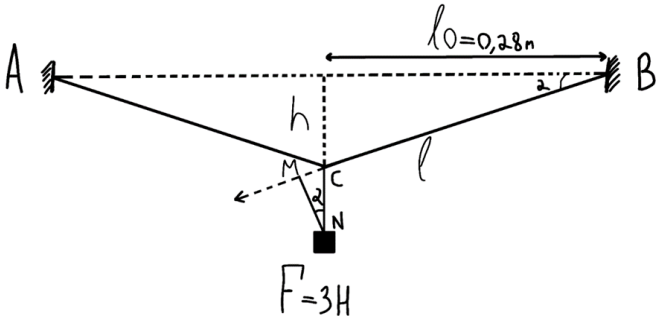
F_{x2}= 3*0,176= 0,528 (Н)

$E_1 = \frac{0{,}318*0{,}28}{5{,}024*10^{-7}*0{,}002}$ = 8,88*10^{10} ($\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$) – старая нейлоновая струна

$E_2 = \frac{0{,}528*0{,}28}{5{,}024*10^{-7}*0{,}004}$ = 7,36*10^{10} ($\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$) – новая нейлоновая струна

Таблица 1 – «Сравнительные характеристики струн»

	F (Н)	ΔL (м)	h (м)	L (м)	E ($\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$)
Старая струна	0,318	0,002	0,03	0,282	8,88*10^{10}
Новая струна	0,528	0,004	0,05	0,284	7,36*10^{10}



Модуль Юнга характеризует жесткость материала относительно деформации растяжения или сжатия. Чем больше значение, тем менее материал подвержен деформации. Если сравнить полученные результаты:

E_1 =8,88*10^{10}($\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$), E_2 =7,36*10^{10}($\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$), следовательно, новые струны обладают меньшей жесткостью и легче деформируются под нагрузкой.

Таким образом, можно сделать вывод, что старые струны являются более прочными и устойчивыми к механическим воздействиям, поскольку имеют больший модуль Юнга. Новые же струны мягче и сильнее реагируют на внешние усилия, проявляя большую эластичность.

Это может быть связано с полимеризацией и старением материала: нейлон является полимерным материалом, свойства которого со временем меняются. Под воздействием окружающей среды (температуры, влажности и механических нагрузок) молекулы полимера начинают уплотняться и образовывать дополнительные водородные связи между цепочками молекул. Что и ведет к увеличению прочности и жесткости материала. Полимер состоит из маномеров, которые связаны амидной связью, имеющие группу – NH_2. Также причиной большей жесткости является уменьшение эластичности. Со временем молекулярные цепи нейлона становятся более упорядоченными, теряя свою гибкость. Это снижает способность материала растягиваться, что проявляется увеличением модуля Юнга. Все перечисленные свойства способствуют постепенному изменению свойств нейлона. Однако стоит понимать, что повышенная жесткость струн ухудшает их звучание. Из-за чего музыканты предпочитают регулярно менять струны и следить за состоянием их инструмента.

Предложения: чтобы поддерживать высокое качество звучания и долгий срок службы струн, необходимо придерживаться рекомендаций производителей, правильно ухаживать за инструментами и заботиться о своем музыкальном оборудовании.

1. Стретт (Лорд Рэлей), Дж. В. Теория звука /; ред., предисл.С. М. Рытов, пер. с англ. П. Н. Успенский, пер. с англ. С. А. Каменецкий. — 2-е изд. Москва : ОГИЗ ГТТИ, 1955.
2. Савчук В.С., Герасимова О.А. Акустика музыкальных инструментов. Учебное пособие / В.С. Савчук, О.А. Герасимова. — СПб.: Издательство Политехнического университета, 2019. — 256 с.
3. Тихонов К.Е. Испытания механических свойств гитарных струн / К.Е. Тихонов // Вестник Московского технологического института. — Москва, 2023. — № 2. — С. 56–64.
4. Красильников В. А., Крылов В. В. «Введение в физическую акустику», М.: Наука, 1984.

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СИЛ И КОНФИГУРАЦИЙ МЕХАНИЗАЦИИ КРЫЛА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

А. Ю. Петров
МБОУ «Лицей № 2» г. Братска
ArtemPetrov8002@yandex.ru

Аэродинамические характеристики воздушных судов играют ключевую роль в обеспечении их эффективности, безопасности и эксплуатационной пригодности. Одним из важнейших аспектов в проектировании и эксплуатации летательных аппаратов является изучение влияния физических сил и явлений, а также конфигураций механизации крыла на их аэродинамические свойства.

Современные достижения в области аэродинамики позволяют более точно моделировать и предсказывать поведение воздушных судов в различных режимах полёта. Важную роль в этом процессе играют такие факторы, как подъёмная сила, сопротивление воздуха, вихри, турбулентность и взаимодействие различных элементов конструкции крыла. Кроме того, изменение конфигурации механизации крыла — например, закрылков, элеронов и других элементов — существенно влияет на управляемость и показатели летных характеристик.

Область исследования: влияние различных факторов на полёты воздушных судов.

Объектом данного исследования являются аэродинамические характеристики воздушных судов (ВС), которые существенно зависят от механизации крыла и физических сил, действующих на них. В частности, внимание будет сосредоточено на анализе влияния различных конфигураций механизации крыла, включая закрылки, предкрылки и их комбинации, на подъемную силу, аэродинамическое сопротивление и общую эффективность полета.

Для проведения исследования я поставил перед собой цель: изучить и систематизировать физические силы, действующие на самолет во время полета, конфигурации различной механизации крыла, а также внешние (погодные) явления для понимания их роли в аэродинамических характеристиках и представить результат в наглядной форме для лучшего понимания школьниками 9-11 классов роли описанных выше факторов на полёт воздушного судна.

Также я поставил перед собой задачи:

1. Провести теоретический анализ физических сил, действующих на самолет в полете, включая: подъемную силу, силу тяжести, силу тяги, силу аэродинамического сопротивления.

2. Исследовать влияние перечисленных сил на ключевые этапы полета самолета (взлет, набор высоты, горизонтальный полет, снижение и посадка).

3. Разработать математические модели или графические зависимости, описывающие влияние физических сил на параметры полета самолета.

4. Предложить способы визуализации материала для образовательных целей, чтобы сделать тему доступной и понятной для школьников старших классов (9-11 классы).

Актуальность темы особенно высока для Российской Федерации. Под влиянием международной конкуренции и доминирующего авторитета зарубежных стран в области авиастроения отечественная авиационная промышленность столкнулась с серьезным кризисом. Эта проблема усугубилась в XXI веке из-за введения

экономических и технологических санкций, что существенно затруднило развитие ключевых направлений авиационной индустрии. В условиях ограниченного доступа к современным технологиям и нарастающей потребности в суверенных разработках данная проблема требует особого внимания со стороны научного сообщества.

Кроме того, результаты проведенного исследования могут быть практически применимы в образовательной сфере. Они могут способствовать подготовке школьников старших классов (9–11 классы) к поступлению в профильные высшие учебные заведения, специализирующиеся на авиации. Также материалы исследования могут быть использованы для проведения факультативных занятий или лекций для старшеклассников, проявляющих интерес к авиационным наукам. Таким образом, данное исследование имеет как теоретическую значимость, так и практическую направленность, способствуя популяризации авиационных знаний и подготовке квалифицированных специалистов в данной области.

1. Аронин, Г. С. Практическая Аэродинамика [текст] / Г. С. Аронин – СССР, Москва: Военное издательство министерства обороны, 1962. – 337 с.
2. Аэродинамика. Определение аэродинамики и её характеристики [электроннный ресурс] – Режим доступа : https://ru/wikipedia/org/wiki/Аэродинамика – Дата доступа : 12.02.2025.
3. Баяндина, Т.А. Динамика полёта самолёта. Расчёт траекторий и лётных характеристик [текст] / Т. А. Баяндина – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 148 с.
4. Бирюк, В. В. Аэродинамика и самолётостроение: учебное пособие [текст] / В. В. Бирюк- Самара: Изд-во Самарского университета, 2018 – 179 с.
5. Ефимов, В. В. Основы авиации. Основы аэродинамики и динамики полёта летательных аппаратов в 2-ух частях [текст] / В. В. Ефимов - Москва, 2003. – 1 часть – 64 с., 2 часть – 53 с.
6. Калинин, Э. О. практическое руководство для частных пилотов [текст] / Э. О. Калинин, 2014. – 176 с.
7. Корнев, В. М. Конструкция и основы эксплуатации летательных аппаратов [текст] / В. М. Корнев – Ульяновск, 2009. - 129 с.
8. Макаревский, А. И. Силы, действующие на самолёт в полёте и при посадке [текст] / А. И. Макаревский, Т. А. Француз – Москва: Издательство новой техники НКАП, 1943. – 64 с.
9. Практическая Аэродинамика. Силы и моменты, действующие на самолёт [электронный ресурс] – Режим доступа : https://vk.com/wall-123440787_2715 - Дата доступа : 12.02.2025.
10. Саленко, С. Д. Динамика полёта. Устойчивость и управляемость летательных аппаратов [текст] / С. Д. Саленко, А.Б. Обуховский – Новосибирск, 2015. – 161 с.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Яхутдинов Алексей
Научный руководитель: А. О. Малакичев
МАОУ «Лицей ИГУ» г. Иркутска

Функциональное уравнение – уравнение, выражающее связь между значением функции в одной точке с её значениями в других точках. Задачи, связанные с решением функциональных уравнений, достаточно часто встречаются в задачах повышенной трудности и в олимпиадных задачах. В то же время в школьной программе практически не затрагиваются способы решения таких задач. Поэтому ощущается потребность в пособии, которое на простых и конкретных примерах способно показать читателю весь список вариантов взаимодействия с ними для школьного уровня знания математики. В работе рассмотрены основные типы функциональных уравнений, доступны для решения методами школьной математики. Разобраны примеры таких задач, разработаны алгоритмы решения для учеников.

1. Введение

- Актуальность и новизна:

В настоящее время довольно мало пособий, обучающих решению функциональных уравнений школьников. Поэтому ощущается потребность в пособии, которое на простых и конкретных примерах способно показать читателю весь список вариантов взаимодействия с ними для школьного уровня знания математики.

- Цель работы:

Систематизация методов решения функциональных уравнений средствами элементарной математики.

- Задачи:

Для решения озвученной проблемы, я обозначил для себя несколько основных задач:

1. изучить и проанализировать существующую литературу;
2. мтруктурировать методы решения функциональных уравнений;
3. описать и разобрать качества каждого метода, опираясь на примеры.

- Структура и методы исследования:

В работе я прибегнул к следующим методам исследования проблемы:

1. наблюдение;
2. опрос;
3. анализ;
4. синтез.

- Перспективы:

Рассмотреть больше узкоспециализированных методов решений для всех классов уравнений. Изучить и разобрать методы решения функциональных уравнений в классе дифференцируемых и производящих функций. Разобрать решения других классических функциональных уравнений, таких как общее функциональное уравнение Коши, функциональное уравнение Йенсена и др.

2. Ввод понятия функциональных уравнений

Функциональное уравнение – уравнение, выражающее связь между значением функции в одной точке с её значениями в других точках.

Решить функциональное уравнение – значит найти все функции, которые тождественно ему удовлетворяют.

Функциональные уравнения возникают в самых различных областях математики, обычно в тех случаях, когда требуется описать все функции, обладающие заданными свойствами. Например, уже знакомые функциональные уравнения из школьного курса, описывающие чётность и периодичность функции.

$$f(x) = f(-x);\ f(x) = -f(-x);\ f(x+a) = f(x)$$

Также к использованию функциональных уравнений прибегают в ситуациях, когда задача не сводится привычными методами к решению алгебраического уравнения и необходимо определить характер взаимодействия данных друг с другом. В основном, с такими проблемами сталкиваются в физике, неевклидовой геометрии.

При решении функциональных уравнений часто является важным промежуток, на котором задана исходная функция. Для обозначения области определения и области значения функции в уравнении используется обозначение:

$$f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$$

где множество, стоящее после двоеточия - область определений, а множество, стоящее после стрелки – область значений.

При подстановке вместо переменной некоторого значения, используются различные обозначения, например, как:

$$\equiv;\ ==;\ \Rightarrow;\ \approx;\ :=$$

В этой работе ниже будет использоваться обозначение « := ».

Существуют несколько основных классов функциональных уравнений:

1. Функциональные уравнения, не содержащие свободных переменных в видах:
   - непрерывных функций;
   - ограниченных функций;
   - дифференцируемых функций (в этой работе рассматриваться не будут).
2. Функциональные уравнения, содержащие свободные переменные.

Данный вид уравнений является наиболее распространенным, и с ним чаще всего встречаются математики при решении задач, используя функциональные уравнения.

Они могут быть совершенно различных видов.

Также различают функции по типу принимаемого аргумента:

- функции натурального аргумента;
- функции целого аргумента;
- функции рационального аргумента;
- функции действительного аргумента;
- функции комплексного аргумента.

3. Методы решения

3.1. Метод подстановок

Метод подстановки – самый простой способ взаимодействия с функциональными уравнениями. Он основывается на изменении или замене аргумента, подставляемого в функцию, для получения частных случаев или выявления закономерности, вследствие чего обнаружения новых свойств искомой функции. В целом, иногда может быть полезным перебрать несколько вариантов подстановок в уравнении для лучшего понимания поведения искомой функции. Данный метод может применяться для всех видов функций и классов, если на входящий аргумент не стоят некоторые условия.

Рассмотрим несколько примеров:

Будем рассматривать решения видов непрерывных функций.

Все функции f: $\mathbb{R} \to \mathbb{R}$ без учёта ОДЗ на значение и аргумент.

$$a)\ 2f(x) + f(0)(x-1) + f(1) = x^2 + 4$$

$$b)\ 3f(x) + f(\frac{1}{x}) = 4x$$

$$c)\ f(2x+y) - f(x-y) = 2x$$

a) $2f(x) + f(0)(x-1) + f(1) = x^2 + 4$

Заметим, что помимо искомой функции в уравнении присутствуют 2 неизвестных константы; f(0) и f(1). Для нахождения значения функции в этих точках можно подставить вместо X нужные значения.

$$X := 1$$

$$2f(1) + 0 * f(0) + f(1) = 5 \text{ тогда } f(1) = \frac{5}{3}$$

$$X := 0$$

$$2f(0) - f(0) + f(1) = 4 \text{ подставим f(1): } f(0) + \frac{5}{3} = 4, \text{ тогда } f(0) = \frac{7}{3}$$

Подставим найденные переменные в исходное уравнение и получим, что

$$f(x) = \frac{3x^2 - 7x + 14}{6}$$

После нахождения предполагаемого ответа, его необходимо проверить подстановкой.

b) $3f(x) + f(\frac{1}{x}) = 4x$

Нужно знать, что вместо аргумента в функцию можно подставить не только число, но и другую функцию, ведь для функции f(x) принимать значение от X или от g(x) не имеет особого значения, если при X функция g(x) определена.

Так, при $x: = \frac{1}{x}$: $f(\frac{1}{x}) = f(x)$ выйдет система:

$$\begin{cases} 3f(x) + f(\frac{1}{x}) = 4x \\ 3f(\frac{1}{x}) + f(x) = \frac{4}{x} \end{cases}$$ помножив верхнее равенство на 3 и вычтя из него нижнее, получается $9f(x) + 3f(\frac{1}{x}) - 3f(\frac{1}{x}) - f(x) = 12x - \frac{4}{x}$ преобразовав равенство, выйдет

$$f(x) = \frac{3}{2}x - \frac{1}{2x}$$

c)

$$f(2x + y) - f(x - y) = 2x$$

При работе с функциональными уравнениями нужно понимать, что в большинстве случаев ответ может содержать некую переменную, задаваемую пользовательски.

Для упрощения работы с уравнением необходимо избавиться от второй неизвестной функции и работать только с одной.

$$\text{Пусть } (x; y) := \frac{x}{3}; \frac{x}{3}, \text{ тогда получим } f(x) - f(0) = \frac{2x}{3}$$

$$f(x) = \frac{2x}{3} + f(0), \text{ пусть } f(0) = c, \text{ где } c \in \mathbb{R}.$$

Если подставить в исходное уравнение значение функции, то получиться найти значение c, либо понять, что c - любое.

$$\frac{4x + 2y}{3} + c - \frac{2x - 2y}{3} - c = 2x \Leftrightarrow 2x = 2x$$

Ответ: $f(x) = \frac{2x}{3} + c$, где $c \in \mathbb{R}$

Примечание: При необходимости решения случаев вида f(g(x)) = h(x), где f(x) – искомая функция, а g(x) и h(x) – известные функции, можно использовать определение обратных функций и сделать подстановку вида X := g - 1(x) (g - 1 (x) – обратная функция.

Простыми словами, можно сказать, что g(x) = a, где a – переменная, и выразить из выражения x, после чего сделать замену на найденное выражение, заменив a на x.)

3.2. Исследование непрерывности функции. Метод математической индукции

При решении большинства задач с использованием функциональных уравнений часто учитывается тот факт, является ли искомая функция непрерывной. В задачах, приводящихся в этой работе, строгое понятие непрерывности не требуется, но стоит знать, что функции такого класса обладают следующими свойствами, в доказательстве которых не сложно убедиться:

1. Если в точках a и b непрерывная функция принимает различные значения, то любое промежуточное между ними значение принимается хотя бы в одной точке отрезка [a; b] (теорема о промежуточном значении).
2. Если две непрерывные функции, заданные на вещественной оси, совпадают во всех рациональных точках, то они совпадают всюду.
3. Если непрерывная функция взаимно однозначна, то она строго монотонна. (Разумеется, верно и обратное.)
4. Непрерывная функция на отрезке ограничена.
5. Если непрерывная функция f(x) строго монотонна, то функция f(f(x)) строго возрастает.

Способ решения в непрерывных функциях, включающий в себя использование свойства 2, называется **методом Коши.** Метод Коши применяется к функциональным уравнениям, содержащим свободные переменные, и отлично сочетается с методом математической индукции.

Математическая индукция — метод математического доказательства, который используется для доказательства различных закономерностей. Его формулировка такова, пусть имеется последовательность $k_1; k_2; k_3; \ldots$ Если для натурального n > 1 из того, что истинны все $k_1; k_2; k_3; \ldots; k_{n-1}$ следует также истинность k_n, то все утверждения в этой последовательности истинны. Для этого сначала проверяется истинность утверждения с номером 1 — **база индукции**, а затем доказывается, что если верно утверждение с номером , то верно и следующее утверждение с номером — **шаг индукции**, или **индукционный переход**.

В классе непрерывных функций можно делать подстановки переменных, не опасаясь нарушением ОДЗ на аргумент. Следовательно, можно делать последовательные подстановки переменных так, чтобы получалась система из функциональных уравнений, в которой можно выразить искомую функцию. Это позволяет делать предельный переход.

Например, стоит знать частный случай предельного перехода:

(1) f(x) = F(x)*f(q(x)) + L(x), где F(x), q(x), L(x) – известные функции, а f(x) – искомая функция.

Обозначив, что $q_1(x) = q(x)$; $F_1(x) = F(x)$; $L_1(x) = L(x), f_1(x) = f(x)$ где:

$$\begin{cases} q_n(x) = q_{n-1}(q(x)) \\ F_n(x) = F_{n-1}(q(x)) \\ L_n(x) = L_{n-1}(q(x)) \end{cases} \text{ то есть } \begin{cases} q_n(x) = q(q(q(\ldots q(x)\ldots))_{n-1-раз} \\ F_n(x) = F(q(q(\ldots q(x)\ldots))_{n-1-раз} \\ L_n(x) = L(q(q(\ldots q(x)\ldots))_{n-1-раз} \end{cases}.$$

Сделаем подстановку: x := q(x) в уравнение (1).

f(q(x)) = F(q(x))*f(q(q(x)))+L(q(x)) => $f_2(x) = F_2(x) * f_3(x) + L_2(x)$

Выходит система: $\begin{cases} f(x) = F(x) * f_2(x) + L(x) \\ f_2(x) = F_2(x) * f_3(x) + L_2(x) \end{cases}$; Подставив $f_2(x)$ из второго уравнения в первое, получиться $f(x) = F_1(x) * F_2(x) * f_3(x) + F_1(x) * L_2(x) + L_1(x)$. Делая подстановку так раз за разом, выйдет, что:

$$(2)\ f(x) = f_{n+1}(x) * \prod_{i=1}^{n} F_i(x) + \sum_{k=2}^{n-1} \left(L_k(x) \prod_{j=1}^{k-1} F_j(x) \right) + L_1(x)$$

Это можно доказать методом мат. индукции:

Пусть верно для некоторого n, что:

$f(x) = f_n(x) * F_{n-1}(x) * F_{n-2}(x) * \ldots * F_2(x) * F_1(x) + L_{n-1}(x) * F_{n-2}(x) * \ldots$
$* F_1(x) + \ldots + L_2(x) * F_1(x) + L_1(x)$

Сделав замену x:=q(x), получится:

$f_2(x) = f_{n+1}(x) * F_n(x) * F_{n-1}(x) * \ldots * F_3(x) * F_2(x) + L_n(x) * F_{n-1}(x) * \ldots$
$* F_2(x) + \ldots + L_3(x) * F_2(x) + L_2(x)$

Из уравнения (1) сделаем подстановку $f_2(x) = \frac{f(x) - L_1(x)}{F_1(x)}$. Так, получиться, что:

$f(x) = f_{n+1}(x) * F_n(x) * F_{n-1}(x) * \ldots * F_2(x) * F_1(x) + L_n(x) * F_{n-1}(x) * \ldots$
$* F_1(x) + \ldots + L_2(x) * F_1(x) + L_1(x)$

Ч.Т.Д.

Так, получив выражение (2), справедлива замена: $A(x) = \lim_{n \to +\infty} \prod_{i=1}^{n} F_i(x)$;

$$\Phi(x) = \lim_{n \to +\infty} \sum_{k=2}^{n-1} \left(L_k(x) \prod_{j=1}^{k-1} F_j(x) \right) + L_1(x);\ G(x) = \lim_{n \to +\infty} q_n(x);$$

Выходит выражение:

(3). $f(x) = A(x) * f(G(x)) + \Phi(x)$.

Если функция G(x) равна некоторому числу «a», то значение исходной функции будет найдено. Если в предварительном уравнении $\lim_{n \to +\infty} q_n = \infty$, то необходимо сделать подстановку, которая будет давать конечный предел. Удобность этого случая заключается в том, что к нему можно привести множество более сложных выражений. Особенно удобно решать уравнения такого вида, когда F(x) = 1 или L(x) = 0. Рассмотрим примеры:

Все функции из $f: \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ без учёта ОДЗ для значений и аргумента.

$$a) f(x + y) = f(x) + f(y)$$

$$b) f(x + y) = f(x) * f(y)$$

$$c) f(x) = a^x f\left(\frac{x}{5}\right)$$

$$d) f(x) = x(x + 1) + f(2x)$$

$$e) f(x + a) = \frac{1}{2} + \sqrt{f(x) - f^2(x)} : a > 0;$$

Доказать: f(x) - периодичная. Найти: f(x), которые не являются константами при a=1.

a) (1)f(x + y) = f(x) + f(y)

Представленное уравнение является одним из самых знаменитых и исследованных функциональных уравнений. Это аддитивное уравнение Коши или уравнение линейной однородной функции Коши. Также существуют ещё 3 схожих с данным уравнением Коши: уравнение показательной функции, уравнение логарифмической функции, уравнение степенной функции.

Найдём все решения уравнения в классе непрерывных и монотонных функций:

Положим подстановку вида y := 0, получится, что f(x)=f(x) + f(0). Тогда f(0) = 0.

Затем, сделаем подстановку y := x в уравнение (1). Выходит, что f(2x) = 2f(x).

Делая замену y := 2x; y := 3x; y=4x;… получится, что f(3x)=f(x)+f(2x); f(4x)=f(x)+f(3x); f(5x)=f(x)+f(4x);… соответственно. Последовательно подставляя в получившиеся уравнения значения f(2x); f(3x); f(4x);…, выходит, что f(3x)=3x; f(4x)=4x; f(5x)=5f(x);…

Тогда предположим, что для f(n*x) = n*f(x): n ϵ $\mathbb{N}$. Докажем, что для n+1 будет справедливо то же выражение и тем самым совершается шаг индукции.

Сделаем в исходном уравнении замену (x; y) := (n*x; x), выходит система:

$$\begin{cases} f(x*n) = f(x*n) + f(x) \\ f(x*n) = n*f(x) \end{cases}$$

В итоге, f(x*(n+1)) = f(x)*(n+1).

Сделаем подстановку x := 1

$$f(n+1) = f(1)*(n+1)$$

При f(1) = C; (n+1) := x.

$$(2)f(x*C) = C*f(x): x \in \mathbb{N} \cup \{0\}; C \in \mathbb{R}.$$

Теперь, необходимо доказать это для целых чисел:

Сделаем подстановку y := -x в уравнение (1).

$\begin{cases} f(0) = f(x) + f(-x) \\ f(0) = 0 \end{cases}$ таким образом f(x) = -f(-x). Следовательно, для отрицательных X справедливы все те же условия, только со знаком минус.

Осталось доказать справедливость равенства (2) для рациональных чисел:

Сделаем подстановку $x := \frac{x}{m}$: m ϵ $\mathbb{N}$ в выражение (2), только с x ϵ $\mathbb{Z}$.

$$\begin{cases} f(\frac{x*C}{m}) = C*f(\frac{x}{m}) \\ f(x*C) = C*f(x) \end{cases} \ll=\gg \begin{cases} f(\frac{x*C}{m}) = \frac{m*C*f(\frac{x}{m})}{m} \\ f(x*C) = C*f(x) \end{cases}$$

Это будет равносильным, так как m ϵ $\mathbb{N}$.

$$f(x*\frac{C}{m}) = f(x)*\frac{C}{m}$$

$$(3)f(x*Q) = f(x)*Q$$

Аналогично доказывается для отрицательных чисел.

Мы доказали, что исходное выражение и выражение (3) совпадают во всех рациональных точках. По свойству 2 для непрерывных функций можно сказать, что f(x*C) = C*f(x): x ϵ $\mathbb{R}$.

Также можно сказать, что при C = 0; f(x) = 0 для всех X.

Примечание: общим решением всех функциональных уравнений Коши является f(x) = 0

Помимо основных 4 функциональных уравнений Коши существует уравнение Коши общего вида. Оно в этой работе рассматриваться не будет.

b)

$$(1)\ f(x+y) = f(x)*f(y)$$

Представленное выражение - это уравнение показательной функции Коши.

Сделаем подстановку y := 0 в уравнение (1).

f(x) = f(x)*f(0), тогда, либо f(0) = 1, либо f(x) = 0.

Пусть f(0) = 1

Сделаем замену $y := x;\ y := 2x;\ y := 3x\ldots$ в уравнение (1).

Тогда соответственно получим:

$f(2x) = f^2(x);\ f(3x) = f^3(x);\ f(4x) = f^4(x);\ldots$ Тогда можно сделать предположение, что

$f(vx) = f^v(x)$. Докажем это.

Пусть для некоторого натурального числа n справедливо, что $f(nx) = f^n(x)$. В таком случае, сделаем замену $y := nx$ в уравнение (1).

$f((n+1)x) = f(x) * f(nx) \Rightarrow f((n+1)x) = f(x) * f^n(x) = f^{n+1}(x)$. Тем самым мы доказали шаг индукции.

Тогда для всех натуральных n справедливо, что $f(nx) = f^n(x)$

Заменив x = 1 в получившиеся уравнение. $f(n) = f^n(1)$. При f(1) = a, то

$$(2)\ f(x) = a^x :\ x \in \mathbb{N} \cup \{0\}$$

Сделаем замену y := -x в уравнение (1).

f(0) = f(x)*f(-x) зная, что f(0) = 1, то $f(-x) = \frac{1}{f(x)} = f^{-1}(x) = f(-x)$ Так, мы доказали, что уравнение (2) справедливо для целых чисел.

Тогда $f(x) = f^{\frac{m}{m}}(x)$, где m - натуральное число. Сделаем замену $x := \frac{xn}{m}$, где n - целое число в получившиеся выражение.

$f(\frac{xn}{m}) = f^{\frac{m}{m}}(\frac{xn}{m})$ по уравнению (2) для целых чисел будет справедливо, что

$$f(x\frac{n}{m}) = f^{\frac{n}{m}}(x)$$

Используя свойство 2. для непрерывных функций, выходит, что

$f(x) = a^x$ для любого x.

c)

$$(1)\ f(x) = a^x * f(\frac{x}{5})$$

Данное уравнение можно представить в виде: f(x) = F(x)*f(q(x))+L(x), где $L(x) = 0;\ F(x) = a^x;\ q(x) = \frac{x}{5}$.

Тогда можно сделать предельный переход под знаком бесконечности на функцию q(x).

$$\lim_{n \to +\infty} q_n(x) = \frac{x}{5^n} = 0;\ (2) \lim_{n \to +\infty} \prod_{i=1}^{n} F_i(x) = a^{x+\frac{x}{5}+\frac{x}{25}+\frac{x}{125}+\cdots} = a^{\frac{5}{4}x}$$

Выражение (2) было сделано по свойствам степеней и сумме бесконечной геометрической прогрессии с частным в пределе от 0 до 1 не включительно.

Выходит, что:

$$f(x) = C * a^{\frac{5}{4}x}: C = f(0);\ C \in \mathbb{R}$$

Проверку данного ответа сделайте самостоятельно.

d)

$$(1)\ f(x) = x(x+1)+f(2*x)$$

В этом уравнении проводить предельный переход под знаком бесконечности не получится, так как $\lim_{n \to +\infty} 2^n x = +\infty$. Тогда сделаем подстановку $x := \frac{x}{2}$ в уравнение (1).

$f(\frac{x}{2}) - \frac{x(x+4)}{4} = f(x)$Теперь можно сделать переход, где $L(x) = -\frac{x(x+2)}{4}; q(x) = \frac{x}{2}; F(x) = 1$

$$\lim_{n\to+\infty} q_n(x) = \frac{x}{2^n} = 0;\ \sum_{i=1}^{n-1} L_i(x) = -x(\frac{x}{4}+\frac{1}{2}+\frac{x}{16}+\frac{1}{4}+\frac{x}{64}+\frac{1}{8}+\dots) = -x(1+\frac{x}{3})$$

Тогда $f(x) = C - \frac{3x+x^2}{3}: C = f(0);\ C \in \mathbb{R}$

Проверьте данное решение самостоятельно.

e)

$$(1)\ f(x+a) = \frac{1}{2} + \sqrt{f(x) - f^2(x)}$$

Сначала докажем первое утверждение, что функция является периодичной, то есть f(x+b)=f(x).

Посчитаем ОДЗ для значений функции:

Очевидно, что как минимум $f(x+a) \geq \frac{1}{2}$, так как корень не меньше нуля.

Так же $f(x) - f^2(x) \geq 0$ по вышеуказанным причинам. Решая квадратное неравенство относительно f(x), получим, что $f(x) \in [0;1]$. Так как мы рассматриваем класс непрерывных функций, то по теореме о промежуточном значении или, в этой статье, свойству 1 функция будет принимать значение 0.5 ходя в 1 точке. Вместе с этим, в этой точке лежит вершина параболы $f(x) - f^2(x)$, так что, подставив её значение вместо выражения, мы найдём промежутки. Подставив, выходит, что

$$f(x) \in [\frac{1}{2};\ 1].$$

После определения ОДЗ мы можем возвести обе части равенства в квадрат, предварительно перенеся 0.5 в левую часть, получим:

$$f^2(x+a) - f(x+a) + \frac{1}{4} - f(x) + f^2(x) = 0;$$

Теперь сделаем замену (x := x+ a) в уравнение (1). Выходит:

$$\begin{cases} f(x+2a) = \sqrt{f(x+a) - f^2(x+a)} \\ f(x+a) - f^2(x+a) = (f(x) - \frac{1}{2})^2 \end{cases} \Rightarrow\Rightarrow f(x+2a) = \frac{1}{2} + \left|f(x) - \frac{1}{2}\right|$$

С учётом ОДЗ: f(x+2a) = f(x). Периодичность доказана.

Допустим, что f(x) = C = f(x+2a)=f(x+4a)=…

$$\text{Тогда } f(x+a) = \frac{1}{2} + \sqrt{C - C^2} = f(x+3a) = \dots$$

Из этого можно сделать вывод, что найдя значения функции в оном из множества промежутков [2a*n; 2a*n+a), где n – произвольное целое число, мы сможем найти значения функции во всех точках.

Пусть на заданном промежутке f(x) – линейная функция и $f(2an) = \frac{1}{2};\ f(2an + a) = 1$

Тогда, по уравнению линейной функции по 2 точкам $f(x) = \frac{1}{2} + \frac{x-2an}{2a}$. Следовательно, подставив в уравнение (1) найденную функцию и промежутки, получим, что:

$$f(x) = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{1-(x-2na)^2}}{2a}:\ x \in [2an + a;\ 2an + 2a).$$

3. Монотонность, инъективность, сюръективность и биективность

Монотонная функция – функция, постоянно возрастающая или постоянно убывающая на всей области определения. Функция может быть быть монотонной на некотором промежутке. Чтобы функция была монотонной, необходимо, чтобы она имела разрывы, длину которых можно посчитать (не равно бесконечности).

Работая с монотонными функциями, часто можно свести задачу, к рассмотрению некоторых случаев, выходя на противоречие.

Существуют четыре вида непрерывных функций:

- Возрастающая, либо неубывающая: $\forall x, y;\ x > y: f(x) \geq f(y)$
- Строго возрастающая: $\forall x, y;\ x > y: f(x) > f(y)$
- Убывающая, либо не возрастающая: $\forall x, y;\ x > y: f(x) \leq f(y)$
- Строго убывающая $\forall x, y;\ x > y: f(x) < f(y)$

Если функция строго возрастающая (убывающая), то каждому значению функции соответствует только одно значение аргумента. Такая функция называется взаимно однозначной. Разумеется и обратное утверждение, что если непрерывная функция взаимно однозначна, то она монотонна.

Существуют следующие свойства монотонных функций:

1. Если монотонная функция f возрастает (убывает), то -f монотонно убывает (возрастает).
2. Если монотонная функция f возрастает (убывает), то $\frac{1}{f}$ монотонно убывает (возрастает).
3. Если монотонные функции f и g возрастают (убывают), то f + g монотонно возрастает (убывает).
4. Для любой монотонной функции f функция f(f(x)) - строго возрастает.
5. Если функция f монотонна, то уравнение f(x) = C, где C - произвольное число, будет иметь не более 1 решения.
6. Если монотонная функция f строго возрастает, а монотонная функция g строго убывает, то уравнение f(x)=g(x) будет иметь не более 1 решения.
7. Если функция f строго возрастает (убывает) на некотором промежутке, то для любых X и Y с этого промежутка при f(x) = f(y) равносильно x=y. Такой факт справедлив и для функциональных неравенств, что если f непрерывно возрастает(убывает) и f(x) > f(y), то x > (<) y.

Сюръективная функция – функция, для которой каждый элемент множества значений является образом хотя бы 1 элемента множества аргументов. (функция, дающая значения на всех действительных числах).

Инъективная функция – функция, для которой каждый элемент множества значений является образом только одного аргумента. (функция, у которой какое-то значение Y может следовать только из единственного X).

Биективная функция – функция, являющаяся и сюръективной, и инъективной одновременно, где каждый элемент множества чисел является образом только одного элемента из множества аргументов.

Довольно часто при решении функциональных уравнениях прибегают к рассмотрению свойств вышеупомянутых функций. Это может значительно упростить задачу сведя оставшееся решение практически к двум строчкам.

- Обычно, для доказания сюръективности функции достаточно свести уравнение в вид, где в одной части его будет некая известная нам функция, с областью значений на всей числовой оси, а во во второй части будет выражение с искомой функцией, из которого будет ясно, что при не соблюдении сюръективности область значений функции становиться больше, чем область определений.

Из сюръективности функции следует, что обязательно найдётся хотя бы 1 аргумент, что функция будет равна необходимому для решения нам значению.

($\forall b \in \mathbb{R}\ \exists a \in \mathbb{R} : f(a) = b$) Так что, если некоторая функция принимает значения от сюръективной функции, то сюръективную функцию можно заменить на любую другую функцию подобного рода.(H(f(x)) - определена, где f(x) - сюръективная, то $H(x);\ H(x^3);\ H(tg(x))$ - определены.

- Доказательство инъективности функции тоже не является сложным. Так, часто используют метод от противного: Пусть существуют такие n и k, что f(n) =

f(k); n ≠ k. Из некоторых преобразований получается, что n = k, и возникает противоречье.

Из инъективности функции может следовать очень многое. Например, если при равенстве двух значений функций от разных выражений, выделяется из исходного уравнения, то эти выражения равны. (f(g(x)) = f(h(x)) => g(x) = h(x)

- Биективность доказывается путём совмещения доказательств сюръективности и инъективности.

Из биективности функции можно смело утверждать, что для любого значения существует, единственный аргумент.

В качестве примеров рассмотрим следующие уравнения:

$$a) f(f(a) + f(b) + f(c)) = a + b + c$$

$$c) f(f(x) + y) = 2x + f(f(y) - x)$$

$$d) f(f(x)) = x + 2011$$

Существует ли функция, являющаяся решением данного уравнения, с областью значений > 2011?

a)

(1) f(f(a)+f(b)+f(c)) = a+b+c

Для начала докажем, что функция инъективная.

Инъективная функция – функция, для которой различные элементы множества аргументов соответствуют различным элементам множества значений функции.

Пусть существуют такие **различные** действительные числа X и Y, что f(x) = f(y). Так, сделаем подстановку (a, b, c) := (x, x, x) в уравнение (1), затем в это же уравнение сделаем подстановку (a, b, c) := (y, y, y). Выходит система $\begin{cases} f(3f(x)) = 3x \\ f(3f(y)) = 3y \\ f(x) = f(y) \end{cases}$ Откуда 3y = 3x, что влечёт противоречие. Следовательно, искомая функция инъективна.

В таком случае, при подстановке (a, b, c) := (x, x-1, x+1) будет справедливо равенство:

f(f(x) + f(x-1) + f(x+1)) = 3x = f(3f(x)) => f(3f(x)) = f(f(x) + f(x-1) + f(x+1))

Зная, что функция является инъективной, то из равенства следует, что:

3f(x) = f(x) + f(x-1) + f(x+1) => (2) 2f(x) = f(x-1) + f(x + 1). Выражение (2) является уравнением арифметической прогрессии с разностью один. Таким образом, функция имеет вид f(x) = C + x - 1, где C – произвольная константа. Поскольку $C \in \mathbb{R}$, то такое выражение будет равносильно f(x) = C + x. Подставим полученный ответ в уравнение (1) для определения C.

f(a + b + c + 3C) = a + b + c => a + b + c + 4C = a+ b + c <=> C = 0

f(x) = x

b)

(1) f(xf(y) + x) = xy + f(x)

Сделаем подстановку в уравнение (x; y) := (1, y - f(1)) в уравнение (1).

(2) f(1+f(y - f(1)) = y

Из уравнения (2) следует, что функция является сюръективной. Докажем, что она инъективна, а следовательно и биективна.

Пусть существуют такие n и k, что n ≠ k; f(n) = f(k), тогда при последовательной подстановке y := n + f(1) ; y := k + f(1) в уравнение (2):

$\begin{cases} f(1 + f(n)) = n + f(1) \\ f(1 + f(k)) = k + f(1) \end{cases}$ => n = k возникает противоречье. Тогда функция биективна.

Из биективности следует, что f(a) = 0; f(b) = -1. Сделаем подстановку y := a + f(1) в уравнение (2):

$$f(1 + f(a)) = a + f(1) \Rightarrow f(1) = a + f(1) \Leftrightarrow a = 0$$

Сделаем подстановку y := b в уравнение (1):

$$f(f(b)x+x) = xb + f(x) \Rightarrow f(0) = xb + f(x) \Rightarrow f(x) = -bx$$

Подставим получившийся ответ в уравнение (1):

$$f(-bxy + x) = xy - bx \Rightarrow b^2xy - bx = xy - bx \Rightarrow b^2 = 1$$

Выходит, что $f(x) = \pm x$

c)

$$(1)\ f(f(x) + y) = 2x + f(f(y) - x)$$

Сделаем подстановку y := -f(x) в уравнение (1):

$$f(0) = 2x + f(f(-f(x)) - x)$$

$$f(f(-f(x)) - x) = f(0) - 2x$$

Если функция f(x) не сюръективна, то тогда функция f(f(-f(x)) - x) – будет принимать меньше значений, чем f(x). Выходит, что её область определения меньше области значений. Противоречие. Следовательно, f(x) – сюръективная.

Пусть существуют такие A; B, что $f(A) = f(B);\ A \neq B$

Сделаем подстановки y := A; y := B в уравнений (1):

$$\begin{cases} f(f(x) + A) = 2x + f(f(A) - x) \\ f(f(x) + B) = 2x + f(f(B) - x) \end{cases}$$

Поскольку, f(A) = f(B), то правые части уравнений равны, следовательно f(f(x) + A) = f(f(x) + B). Если учитывать, что f(x) – сюръективна, то будет следовать, что (2) f(x +A) = f(x + B).

Теперь, сделаем подстановку x := A в уравнение (1):

f(f(A) + y) = 2A + f(f(y) - A) <=> 2A = f(f(A) + y) - f(f(y) - A) <=> f(f(A) + y) - f(f(y)-(A+B)+B)

Из выражения (2) можно сделать следствие f(f(A) + y) - f(f(y)-(A+B)+A), поскольку выражение f(y) - (A+B) будет также сюръективно.Так что, можно записать:

2A = f(f(A) + y) - f(f(y) - A) = f(f(B) + y) - f(f(y) - B) = 2B Противорчье. Следовательно функция инъективна и биективна.

Сделаем подстановку x := 0 в уравнение (1):

f(f(0) + y) = f(f(y)) A из биективности следует, что:

$$f(0) + y = f(y)$$

Подставим решение в исходное уравнение для определения константы.

$$f(x + y + f(0)) = 2x + f(y + f(0) - x) \Rightarrow x + y + 2f(0) = x + y + 2f(0)$$

Тогда ответ f(x) = x + C, где C - произвольная константа.

d)

$$(1)\ f(f(x)) = 2011 + x$$

Сделаем подстановку x := f(f(x)) в уравнение (1):

$$(2)\ f(f(f(f(x)))) = 2011 + f(f(x))$$

Заменив f(f(x)) на значение из уравнения (1), получиться:

$$f(2011 + f(x)) = 4022 + x$$

Отсюда следует, что искомая функция сюръективна, иначе область значений будет больше области определений функции. Выходит, что функция даёт значение на всей числовой оси, что противоречит с условием на область значений функции.

Ответ: нет

3.4. Метод замены функции и приведение функции к известным уравнениям

Используя подобный метод можно наиболее простым способом решать различные сложные уравнения и группы уравнений. Так, к решению двух

неразобранных функциональных уравнений Коши можно подойти с использованием этого метода.

Замена функции представляет собой преставление исходного уравнения, в виде другой функции. Новая функция будет сочетать в себе свойства функций, которые она содержит, а так же свойства выражения в котором они находятся.

Мы знаем, что иногда удобно знать заранее решение некоторых, структур уравнений. Для расширения знаний решений различных уравнений, разберём оставшиеся 2 уравнения Коши:

$$a) f(x * y) = f(x) + f(y)$$
$$b) f(x * y) = f(x) * f(y)$$

(a) f(xy) = f(x) + f(y)

Представленное уравнение называется уравнением логарифмической функции Коши.

Пусть для положительных X и Y существует, такие P и Q, что $P = \log_a x$; $Q = \log_a y$, где a – некоторое положительное число, не равное 1. Тогда существует функция такая, что $f(x) = f(a^P) = r(P)$; r(Q) = f(y) – для всех положительных X и Y.

Тогда выходит система:

$$\begin{cases} f(xy) = f(x) + f(y) \\ P = \log_a x \\ Q = \log_a y \end{cases} \Rightarrow f(a^P * a^Q) = f(a^{P+Q}) = f(a^P) + f(a^Q) \Rightarrow r(P+Q) = r(P) + r(Q)$$

Выходит аддитивное уравнение Коши относительно r(P), решение которого мы знаем и можем вывести. Решением данного уравнения являются r(P) = C*P / r(P) = 0 для произвольной константы C. В таком случае, можно сделать обратную подстановку x в решение. Выходит:

(1) $r(\log_a x) = C * \log_a x = \log_{\frac{1}{ac}} x = \log_b x = f(x)$ для всех положительных X.

Сделаем замену (x, y):= (-x, -x), а также замену (x, y):= (x, x) в уравнение (1). Соответственно выходит:

$$f(x^2) = 2f(-x);\ f(x^2) = 2f(x) \Rightarrow f(x) = f(-x)$$

Таким образом, график функции симметричен относительно оси ординат, что может свидетельствовать о наличии модуля в решении уравнения.

$$f(x) = \log_b |x|.$$

Теперь, сделаем замену y:= 0 в уравнение (1).

f(0) = f(0) + f(x). При y = 0, общим решением является f(x) = 0

b)

(1) f(x*y) = f(x)*f(y)

Последним из разбираемых уравнений Коши в этой статье будет уравнение степенной функции.

Для начала сделаем подстановку y:= 0 в уравнение (1).

f(0) = f(x)*f(0) <=> f(0)*(f(x)-1) = 0 Отсюда f(x) = 1, f(x) = 0, либо f(0) = 0

Поскольку в первых 2 случаях решение уравнения искать не приходится, рассмотрим 3 случай:

Сделаем замену на t и g, что: $a^t = x;\ a^g = y$, так пусть существует такая функция, что ϕ(t) = f(x) для X и Y.

$$f(a^t * a^g) = f(a^t) * f(a^g) \Leftrightarrow f(a^{g+t}) = f(a^t) * f(a^g) \Rightarrow \phi(t+g) = \phi(t) * \phi(g)$$

В итоге, получилось уравнение степенной функции относительно ϕ(t), решениями которого являются ϕ(t) = 0/1 и $\phi(t) = b^t : b \in \mathbb{R}$. Делая обратную подстановку в решение, не равное тождественной константе, получаем, что:

$$\phi(\log_a x) = b^{\log_a x} = a^{C*\log_a x} = a^{\log_a x^C} = x^C = f(x) : x > 0$$

Для отрицательных значений сделаем две последовательные подстановки в уравнение (1): y:= x; (x; y):= (-x; x).

$1\backslash\ f(x^2) = f^2(x);\ 2\backslash\ f(x^2) = f^2(-x) \Rightarrow f^2(-x) = f^2(x)$ Из следствия получается, что необходимо разобрать 2 случая:

1) f(x) = f(-x)

В таком случае при отрицательных значениях ничего не меняется и t, g соответственно равны $\log_a |x|, \log_a |y|$. Решением уравнения будет $f(x) = x^C$

2) f(x) = -f(x)

Во втором случае при подстановке отрицательных значений тоже ничего не изменится, так как при подстановке отрицательного и положительного значения вместо X и Y выйдет выражение f(-xy) = f(x)*f(-y) => -f(xy) = f(x)*f(y) <=> f(x*y)=f(x)*f(y), а при подстановке двух отрицательных значений выйдет, что минусы в правой части уйдут, так как их чётное количество, а в левой части и не появятся, поскольку перемножаются два отрицательных числа.

Так, общими решениями будут $f(x) = 1;\ f(x) = 0;\ f(x) = x^C : C \in \mathbb{R}$.

Теперь мы знаем 4 основные уравнения Коши и их решения. Так что можем использовать их при решении других уравнений.

В приложении вы можете найти другие функциональные уравнения, которые можете использовать в решениях.

Разберём примеры задач:

$$a) f(xy) = f(x)y + f(y)x$$

$$c) f(x+y)f(x-y) = f^2(x)$$

a)

(1) f(xy) = f(x)y + f(y)x

Поделим исходное уравнение на произведение xy.

$$\frac{f(xy)}{xy} = \frac{f(x)}{x} + \frac{f(y)}{y}$$

Пусть существует функция $g(x) = \frac{f(x)}{x}$. В таком случае выходит уравнение:

g(xy) = g(x) + g(y)

Мы знаем, что относительно функции g(x) данное выражение является логарифмическим уравнением Коши и имеет решения $g(x) = \log_C |x|$, где C – произвольная константа, большая нуля и не равная единице.

Тогда функция f будет выражаться:

$$(2)\ f(x) = x \log_C |x| : C \in (0; 1) \cup (1; +\infty);\ x \neq 0$$

Решение (2) удовлетворяет все значения аргумента кроме 0. Так, сделаем подстановку y:= x в уравнение (1):

$$f(x^2) = 2f(x)x$$

Следовательно, существует решение вида f(x) = 0, где f(0) = 0.

b)

(1) f(x+y) + f(z) = f(x + z) + f(y)

f(x+y) - f(y) = f(x+z) - f(z)

Можно понять, что правая часть уравнения не зависит от y, и если сделать подстановку y:= 0, то получим:

$$f(x) - f(0) = f(x+z) - f(z)$$

Аналогично выходит и с z в правой части уравнения.

Пусть существует функция g(x) = f(x) - C: C = f(0):

$$(2)\ g(x) = f(x + z) - f(z)$$

Будет равносильно данное преобразование выражения (2):

$$g(x) = f(x + z) - f(0) - f(z) + f(0) \Rightarrow g(x) = g(x+z) - g(z)$$

Выходит аддитивное уравнение Коши относительно функции g(x).

$$g(x + z) = g(x) + g(z),$$

решением которого будет g(x) = A*x и g(x) = A: A – произвольная константа. Выразив f(x) через g(x), получим:

$$f(x) = C + A * x : \ (A;\ C = f(0)) \in \mathbb{R}$$

$$f(x) = C : \ C = f(0);\ C \in \mathbb{R}$$

c)

$$(1)\ f(x + y)f(x - y) = f^2(x)$$

Данное уравнение называется функциональным уравнением Лобачевского, из которого была выведена функция Лобачевского, определяющая угол параллельности прямых

$П(x) = 2arctg(e^{-\frac{x}{a}})$. Уравнение определяет все показательные функции вида $a^x c$, где a; c – произвольные числа.

Убедимся в этом:

Сделаем подстановку вида y:= x в уравнение (1):

$$(2)\ f(2x)f(0) = f^2(x)$$

Приравняв правые части уравнений (1) и (2) выйдет:

$$f(x+y)f(x-y) = f(2x)f(0)$$

Отсюда следует, если f(0) = 0, то одним из решений уравнения будет f(x) = 0, в противном случае, можно разделить обе части выражения на $f(0)^2$.

(3)

$$\frac{f(x+y)f(x-y)}{f(0)^2} = \frac{f(2x)}{f(0)}$$

Так, сделаем замену на переменные в уравнение (3) S = x + y; D = x - y; S+D = 2x. Также, существует функция g(x), что $g(x) = \frac{f(x)}{f(0)}$. Подставив её в уравнение (3), выйдет:

$$(4)\ g(S)*g(D) = g(S+D)$$

Уравнение (4) представляет собой функциональное уравнение показательной функции Коши относительно g(x) и имеет решения $g(x) = 0;\ g(x) = a^x : \ a \in \mathbb{R} > 0$

В таком случае, f(x) = f(0)*g(x) будет иметь два значения.

$$f(x) = 0;\ f(x) = C * a^x$$

4. Заключение. В данной работе были рассмотрены функциональные уравнения и некоторые способы их решения. В ходе работы было показано, что функциональные уравнения – это общий класс уравнений, в которых искомой является некоторая функция, а также ознакомились с основными методами их решения. Под функциональным уравнением подразумевают уравнения, в которых искомые функции связаны с известными функциями одного или нескольких переменных при помощи операции образования сложной функции. Функциональное уравнение можно также рассматривать как выражение свойства, характеризующего тот или иной класс функций.

Функциональные уравнения имеют большое применение. Так, например, в теории аналитических функций часто применяются для введения новых классов функций, в комбинаторном анализе используются в задачах на подсчёт комбинаторных конфигураций, а также в физике, геометрии и информатике для обоснования законов, теорем и работой с искусственным интеллектом. Так Лобачевский, используя функциональные уравнения вывел формулу угла параллельности, Д'Аламбер использовал функциональные уравнения для обоснования закона сложения сил. Значение соответствующих функциональных уравнений во многих случаях облегчает нахождение решений.

1. Лихтарников Л. М. Элементарное введение в функциональные уравнения / Л.М. Лихтарников. – СПб.: Лань, 1997. – 160 с.
2. Фалин Г., Фалин А. Функциональные уравнения и неравенства / Г. Фалин, А. Фалин // Квант. – 2006. – № 5. – С. 39–45.
3. Турнир Городов, Функциональные уравнения https://turgor.ru/lktg/2006/3/3-3ru.pdf
4. Школково, [2023]. «Функциональные уравнения и неравенства». [онлайн] Доступен по URL: https://3.shkolkovo.online/catalog/3038?SubjectId=7
5. Ильин В.А. Методы решения функциональных уравнений / Ильин В.А. // Соросовский образовательный журнал. - 2001. - № 2. - С. 116 – 120.
6. Файловый архив студентов, [2015]. «StudFiles». [онлайн] Доступен по URL: https://studfile.net/preview/3846065/