

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ УБС-2017

Материалы XIV Всероссийской школы-конференции
молодых ученых
4–8 сентября 2017 Пермь

МОСКВА
2017

УДК 007:519.7:004.9
ББК 22.18: 32.81

<Выходные данные издания>

Научное электронное издание подготовлено Институтом проблем управления РАН и Пермским научно-образовательным центром проблем управления на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета с целью развития и пропаганды достижений современной теории управления.

В сборнике материалов конференции доклады молодых ученых представлены в виде полных статей по следующим направлениям:

- Фундаментальные математические основы теории управления.
- Управление организационными и социально-экономическими системами.
- Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами.

Издание адресовано научным работникам, инженерам и учащимся вузов, специализирующимся в области прикладной математики, теории и систем управления, математических методов в экономике, информационных технологий.

Утверждено к изданию Программным комитетом конференции

Школы-конференции «Управление большими системами» ежегодно проводятся Институтом проблем управления РАН и сетью Научно-образовательных центров (НОЦ) проблем управления России совместно с рядом ведущих научно-исследовательских институтов и вузов России с целью развития и пропаганды достижений современной теории управления. Особенностью последних нескольких конференций является наличие секции «Предзащита» (без публикации материалов докладов), на которой заслушиваются результаты диссертационных исследований, представляемых в ближайшее время к защите.

Каждый год функции главного организатора конференции поручаются одному из региональных НОЦ проблем управления. Предыдущие конференции с большим успехом проходили в Воронеже, Ижевске, Казани, Липецке, Магнитогорске, Перми, Уфе, Арзамасе, Волгограде и Самаре. В 2017 году эти функции были поручены Пермскому НОЦ проблем управления.

Первый раздел содержит доклады, посвященные математическим основам теории управления. Представленная в них тематика достаточно обширна и охватывает проблемы модального, оптимального управления, теории игр, управления сложными системами.

Не менее обширным является второй раздел, посвященный управлению в организационных и социально-экономических системах. Здесь рассматриваются современные теоретико-игровые и оптимизационные модели управления функционированием и развитием организаций, отраслей экономики, регионов, модели управления проектами.

Раздел три посвящен управлению техническими системами и технологическими процессами. В нем представлены результаты применения современной теории управления к решению конкретных технических задач.

ОРГАНИЗАТОРЫ

- Российская академия наук;
- Национальный комитет по автоматическому управлению;
- Научный совет по теории управляемых процессов и автоматизации РАН;
- Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН;
- Арзамасский научно-образовательный центр теории и систем управления (на базе АПИ), руководитель – д.ф.-м.н. Пакшин Павел Владимирович;
- Волгоградский научно-образовательный центр проблем управления (на базе ВолГУ), руководитель – д.ф.-м.н. Воронин Александр Александрович;
- Воронежский научно-образовательный центр проблем управления (на базе ВГАСУ), руководитель – д.ф.-м.н. Головинский Павел Абрамович;
- Инновационный научно-образовательный центр (на базе МАИ), руководитель – д.т.н. Сидельников Юрий Валентинович;
- Инновационный научно-образовательный центр (на базе МВТУ), руководитель – д.э.н. Омельченко Ирина Николаевна;
- Казанский научно-образовательный центр проблем управления (на базе КГТУ), руководитель – д.т.н. Сиразетдинов Рифкат Талгатович;
- Красноярский научно-образовательный центр «Информатика, информационные технологии и управление» (на базе Сибирского федерального университета), руководитель – проф. Подлесный Сергей Антонович;
- Курский научно-образовательный центр проблем управления (на базе ЮЗГУ), руководитель – д.т.н. Емельянов Сергей Геннадиевич;
- Липецкий научно-образовательный центр проблем управления (на базе ЛГТУ), руководитель – д.т.н. Погодаев Анатолий Кириянович;
- Магнитогорский научно-образовательный центр проблем управления (на базе МаГТУ), руководитель – д.т.н. Мезин Игорь Юрьевич;

- Научно-образовательный центр «Системный анализ в управлении» (на базе МИФИ), руководитель – к.т.н. Румянцев Виктор Петрович;
- Пермский научно-образовательный центр проблем управления (на базе ПГТУ), руководитель – д.т.н. Столбов Валерий Юрьевич;
- Самарский научно-образовательный центр проблем управления (на базе СГАУ), руководитель – д.т.н. Засканов Виктор Гаврилович;
- Старооскольский научно-образовательный центр проблем управления (на базе СТИ), руководитель – д.т.н. Еременко Юрий Иванович;
- Тверской научно-образовательный центр проблем управления (на базе ТГТУ), руководитель – д.т.н. Кузнецов Владимир Николаевич;
- Удмуртский научно-образовательный центр проблем управления (на базе УдГУ), руководитель – д.ф.-м.н. Непейвода Николай Николаевич;
- Уфимский научно-образовательный центр проблем управления (на базе УГАТУ), руководитель – д.т.н. Ильясов Барый Галеевич.

КОМИТЕТЫ

ОБЩЕЕ РУКОВОДСТВО

Новиков Д.А., чл.-корр. РАН, директор ИПУ РАН

Ташкинов А.А., д.ф.-м.н., ректор ПНИПУ

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Губко М.В., проф. РАН, д.ф.-м.н., зам. директора (ИПУ РАН),
сопредседатель

Южаков А.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой АТ (ПНИПУ),
сопредседатель

Баркалов С.А., д.т.н., ВГАСУ, Воронеж

Воронин А.А., д.-ф.м.н., ВолГУ, Волгоград

Бурков В.Н., д.т.н., ИПУ РАН,

Москва Громов Ю.Ю., д.т.н., ТГТУ, Тамбов

Емельянов С.Г., д.т.н., ЮЗГУ, Курск

Еременко Ю.И., д.т.н., СТИ, Старый Оскол

Ильясов Б.Г., д.т.н., УГАТУ, Уфа

Коргин Н.А., д.т.н., ИПУ РАН, Москва

Кузнецов В.Н., д.т.н., ТГТУ, Тверь

Логиновский О.В., д.т.н., ЮУрГУ, Челябинск

Мезин И.Ю., д.т.н., МаГТУ, Магнитогорск

Непейвода Н.Н., д.ф.-м.н., ИПС РАН, Переславль-Залесский

Пакшин П.В., д.ф.-м.н., АПИ НГТУ, Арзамас

Подлесный С.А., д.т.н., СФУ, Красноярск

Погодаев А.К., д.т.н., ЛГТУ, Липецк

Сиразетдинов Р.Т., д.т.н., КГТУ, Казань

Столбов В.Ю., д.т.н., ПНИПУ, Пермь

Гитман М.Б., д.ф.-м.н., ПНИПУ, Пермь

Харитонов В.А., д.т.н., ПНИПУ, Пермь

Хлебников М.В., д.ф.-м.н., ИПУ РАН, Москва

Щербаков П.С., д.ф.-м.н., ИПУ РАН, Москва

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Коротаев В.Н., д.т.н., профессор, проректор ПНИПУ, председатель

Фрейман В.И., к.т.н.

Безукладников И.И., к.т.н.

Кавалеров М.В., к.т.н.

Алексеев А.О., к.э.н.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Корепанов В.О.

Модели поведения игроков в экспериментальной
теории игр..... 15

Кочетков С.А., Рассадин Ю.М., Шинкарьук А.Г.

Устойчивость модифицированного вихревого алгоритма
для многозвенного манипулятора 24

Берсенева Н.В., Уткин В.А.

Минимизация нормы обратной связи в задачах
модального управления..... 34

Краснов Д.В.

Синтез робастной системы управления положением
маятника 43

Конкина А.С.

Стохастическая модель Девиса с многоточечным
начально-конечным условием 56

Епифанов А.С.

Методы оценки сложности законов функционирования
автоматных моделей систем 63

Гусев С.С.

Пример алгоритма идентификации статического объекта
управления с априорными ограничениями 75

Горелов М.А., Ерешко Ф.И.

О централизации и децентрализации управления 86

Бычков Е.В., Котлованов К.Ю.

Об одном уравнении соболевского типа третьего порядка 101

Архипов Д.И., Лазарев А.А., Тарасов Г.В.

Определение загрузки ресурсов при поиске нижних
оценок для задачи RCPSP 106

Гаврилова О.В.

Численное исследование оптимального управления для одной математической модели распространения нервного импульса в прямоугольной мембране 118

Кочетков С.А.

Робастное управление асинхронным электроприводом при наличии внешних возмущений..... 129

2. УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Гилязова А.А.

Моделирование ориентированных графов социальных сетей144

Ерешко Ф.И.

Теоретико-игровые модели законотворчества в цифровом обществе 151

Яковлев В.И.

Некоторые аспекты подготовки ИТ-специалистов для отрасли финансовых технологий в условиях цифровой экономики в России 162

Маслова Е.В.

Методы управления рисками ИТ-сервиса в результате их страхования и передачи на аутсорсинг 175

Харитонов В.А., Кривогица Д.Н., Сафонов Н.И.

Инструментальные средства «соединения креативности и технологичности» в задачах выбора 184

Воронин А.А., Исаева И.И.

Трехуровневая система управления процессом урбанизации Волго-Ахтубинской поймы 193

Спирина В.С.

О значимости факторов, учитываемых при моделировании посещаемости торгово-развлекательных комплексов 204

Овчинников А.А.

Методика оценивания уровня сформированности компетенций выпускника вуза 211

<i>Кузнецова О.А., Додонова Н.Л., Глухов В.Н.</i> Модель поведения игроков в деловых играх с модифицированным механизмом Гровса–Лейдярда по распределению ограниченного ресурса.....	220
<i>Гераськин М.И., Егорова В.В.</i> Экономико-математическая модель оптимизации финансового цикла предприятий машиностроения.....	232
<i>Кузнецова М.А., Юдина С.В.</i> Анализ поведения игроков в деловой игре по распределению ресурса в режимах с использованием СППР по заданным моделям поведения и без них	240
<i>Чугунов А.П.</i> Учет приоритетов студентов при управлении индивидуальными учебными планами студентов в условиях сетевого взаимодействия вузов.....	249
<i>Гуреева Е.Г., Гуреев К.А.</i> Разработка модели управления количественно-качественным составом специалистов нефтедобывающих предприятий при переходе на раздельный сервис при бурении	258
<i>Гуреева Е.Г., Гуреева А.Н.</i> Прикладные технологии моделирования финансового состояния	272
<i>Гуреев К.А., Гуреева А.Н.</i> Значимость объединения принципов связанности и взаимозависимости факторов моделей рынков при управлении рыночной системой	280
<i>Алексеев А.О.</i> Матричные механизмы комплексного оценивания, элементы матриц свёртки которых определены в нечётком виде	288
<i>Клейменова А.А.</i> Результаты разработки методики определения места для открытия магазина шаговой доступности	303

Харитонов М.А.

Оптимизация структуры производственной подсистемы
организации в условиях неопределенности 309

**3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В УПРАВЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ.
МЕХАТРОННЫЕ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ, КОМПЛЕКСЫ И УСТРОЙСТВА**

Лазарев А.А., Некрасов И.В.

Многоресурсная задача цехового планирования:
особенности реализации и сравнение подходов 324

Фрейман В.И., Дубовцева Д.А.

Исследование алгоритмов мягкого декодирования
в приемных устройствах элементов распределенных
систем управления 336

Хуснутдинов Д.З.

Нечеткая логическая система компенсации возмущений
при движении двухзвенного гусеничного
транспортера «Витязь» 347

Галкин А.В., Тырин Д.Ю., Пименов В.А.

Разработка программного обеспечения для моделирования
процесса остывания слитка в установке непрерывной
разливки стали (УНРС) 357

Греков А.В., Федосюк Ю.Р., Пацура В.Г.

Реализация самосинхронных схем на ПЛИС 366

Вихорев Р.В., Прохоров А.С., Скорнякова А.Ю., Тюрин С.Ф.

Усовершенствованные методы реализации
программируемой логики 375

Серкова Д.В.

Задача управления модернизацией водопроводной
сети с целью минимизации аварийности 385

<i>Еременко Ю.И., Олюнина Ю.С.</i> Об определении метода обработки потока данных с целью выявления скрытых характеристик клавиатурного почерка....	397
<i>Цуканов М.А.</i> Использование принципа многоальтернативности в мультиагентных системах	407
<i>Цуканов М.А., Божкова О.А.</i> Разработка алгоритма построения производственного расписания на основе фрактала кантора.....	414
<i>Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Цыганков Ю.А., Боровинских М.Д.</i> О возможности разработки математической модели шаровой мельницы	423
<i>Каримова М.О., Посягин А.И.</i> К вопросу о расчете надежности основного измерительного нейрона в самомаршрутизирующемся аналого-цифровом преобразователе	434
<i>Бояришинова А.С., Шумихин А.Г.</i> Применение искусственных нейронных сетей в алгоритмах управления химико-технологическими процессами и задачах идентификации.....	442
<i>Мещерякова А.О.</i> Математическое моделирование процесса формоизменения поверхностного дефекта подката в процессе холодной прокатки с использованием программного комплекса конечно-элементного анализа.....	454
<i>Южаков А.А., Тур А.И.</i> Выбор алгоритмов для реализации системы машинного зрения	465
<i>Глуценко А.И., Петров В.А.</i> Разработка нейросетевого настройщика для повышения эффективности компенсации возмущающих воздействий при управлении электроприводом постоянного тока.....	474

<i>Сараев П.В., Галкин А.В., Мирошников А.И., Никольская А.А.</i> Обработка объектов интервального типа в системе управления базами данных SQL Server	485
<i>Сараев П.В., Полозова Ю.Е.</i> Использование различных функций активации в структурной идентификации дуальнопараметрических нейронных сетей	493
<i>Бондарев С.Э.</i> Определение внутренних угроз системы «Умный дом» и предложение подходов к предотвращению их реализации	502
<i>Кудрявцев В.А., Рычков С.Л., Шатров В.В.</i> Система моделирования, мониторинга и управления процессом биологической очистки сточных вод	511
<i>Глуценко А.И., Фомин А.В.</i> Модернизация нейросетевого настройщика за счет совершенствования базы правил для режима переходных процессов	527
<i>Сыроквасов А.В.</i> Применение объектно-ориентированного подхода для реализации алгоритмов теории грубых множеств на интервальных данных.....	537
<i>Тюрин А.С.</i> Разработка базы данных для реализации концепции стратегического управления процессами на металлургическом предприятии	543
<i>Гусев С.С.</i> Информационные технологии в управлении сложными системами	550
<i>Вожжаков А.В., Гитман М.Б., Столбов В.Ю.</i> Концепция интеллектуальной системы управления производством на базе лучших практик организации производства	557

<i>Васиньков В.А., Прохоров А.С., Тюрин С.Ф.</i> Электронные регуляторы авиадвигателей с использованием комбинированного резервирования	577
<i>Батин С.Е., Гитман М.Б.</i> Комплексное оценивание прочностных свойств функциональных материалов на основе анализа параметров зёренно-фазовой структуры	584
<i>Алтыева М.Ч.</i> Математическое моделирование процесса нагрева сляба как компонент управления технологическим процессом	600
<i>Некрасова Д.А.</i> Прогнозирование химического состава и температуры стали в конвертерном производстве	609
<i>Спиридонов С.В.</i> Об одном подходе к мониторингу киберугроз в АСУ ТП транспорта газа	616
<i>Якимова А.П.</i> Разработка модели протокола маршрутизации Q-ROUTING.....	622
<i>Даденков С.А., Ибрагимов Р.Р.</i> Модель протокола поискового сервиса DHT	632
<i>Даденков С.А., Кон Е.Л., Харюшина К.И.</i> Построение модели протокола случайного множественного доступа P-Persistent CSMA.....	642
<i>Никитин А.С., Вихорев Р.В., Скорнякова А.Ю.</i> Оптимизация LUT FPGA на основе модифицированного венгерского метода	651
<i>Харьковская И.С., Елистратов А.А.</i> Автоматизированная система поиска уязвимостей в механизмах распределения ограниченного ресурса на основе нейронных систем	661
<i>Истомин Д.А.</i> Управление производством на основе имитационного моделирования логистических потоков.....	665

<i>Карамзина А.Г., Маликова Н.Ш.</i> Информационная система учёта акцизов на нефтеперерабатывающем предприятии	671
<i>Заборских К.Д., Гаврилов А.В.</i> Управление связностью беспроводной мэш-сети.....	680
<i>Клестов Р.А., Столбов В.Ю.</i> Разработка прототипа автоматизированной системы поддержки принятия решений при поиске контуров на изображениях формата DICOM.....	687
<i>Сысоев А.С., Горяйнов А.О.</i> Система массового обслуживания с подключаемым прибором для моделирования автомагистрали с реверсивной полосой	696
<i>Широков А.С.</i> Корректировка плана загрузки агрегатов производственного цеха в условиях изменения производственных мощностей на основе имитационного моделирования	708

1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.816 + 330.42

ББК 22.18

МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ИГРОКОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ИГР¹

Корепанов В.О.²

*(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
РАН, Москва)*

В работе приводится краткий обзор используемых в экспериментальной теории игр моделей поведения людей. Основная модель игры в данной области – это повторяющаяся игра n лиц, которую по наличию истории можно разделить на первый шаг и последующие. Соответственно и модели разбиваются на те, которые используют только описание игры, и те, которые используют описание игры и историю.

Ключевые слова: модели поведения, модели стратегического поведения, стратегическая рефлексия, модели обучения, экспериментальная теория игр, экспериментальная экономика.

1. Введение

Экспериментальная экономика ставит целью анализ реального поведения людей в экономических ситуациях (ситуации, которые участник оценивает в том числе величиной своего выигрыша) на предмет соответствия их разумным, рациональным принципам поведения. В конечном итоге ставится задача построения модели поведения или принятия решений человеком.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-07-01550 А

² Всеволод Олегович Корепанов, кандидат технических наук, (vkoropanov@ipu.ru).

Существуют два класса исследуемых моделей поведения: модели принятия индивидуальных решений и модели стратегического поведения [9]. В первом классе рассматривается ситуация выбора человеком одной альтернативы из множества заданных, возможны также динамические постановки, когда человеку нужно регулярно выбирать свои действия на протяжении определённого времени в динамически меняющейся обстановке. Второй случай принципиально отличается тем, что в данной ситуации действует не один человек, а одновременно несколько, т.е. принимая решения нужно учитывать возможности и принципы принятия решений других участников, что делает эти модели близкими к теории игр, поэтому этот раздел науки называют экспериментальной теорией игр (далее вместо «ситуация» употребляется термин «игра»).

Собственно термин «принятие решений» обычно употребляют в статических ситуациях первого класса, «модель поведения» употребляют в ситуации многократного выбора в динамической ситуации, а «модель стратегического поведения» – в статических и динамических играх второго класса.

Базовыми моделями стратегического поведения можно считать модели для повторяющихся игр, в которых:

- ◆ задано количество шагов принятия решений (в том числе бесконечное),
- ◆ выбор действий игроками происходит на каждом шаге,
- ◆ каждый шаг имеет свой результат – выигрыш каждого игрока,
- ◆ выигрыш игроков на шаге не зависит от шага игры (времени), а только от действий, выбранных игроками,
- ◆ итоговый выигрыш игрока складывается из суммы выигрышей на каждом шаге игры.

Ясно, что такая игра – простейший случай перехода от статической игры к динамической.

Данная работа ставит целью краткий обзор современных моделей стратегического поведения (далее – просто «моделей поведения») для повторяющихся игр.

Стоит заметить, что хотя представленные модели поведения в основном применяются к повторяющимся играм, есть примеры их успешности и для более сложных динамических ситуаций [21].

2. Модели

Структуру повторяющейся игры можно разделить на две части: первый шаг и последующие.

На первом шаге у игроков ещё нет истории игры, и поэтому их принципы принятия решений не должны опираться на историю, модели такого плана могут основываться на трёх классах принципов:

1) равновесных принципах равных сторон – базовые решения теории игр: равновесие Нэша, рационализируемые действия, недоминируемые действия, эффективность по Парето, равновесие дрожащей руки и т.п.;

2) рефлексивных/стратегических принципах: как наиболее вероятно будут вести себя остальные при условии, что они менее разумны, чем размышляющий;

3) нестратегических принципах: случайно, оптимизм/пессимизм, осторожность, минимизация сожалений, максимизация суммарного выигрыша игроков, справедливость, доброжелательность и т.п. [24].

Модели 1-го класса являются классическими экономическими моделями, построенными на идеях рациональности игроков, модели же 2-го и 3-го (менее) класса – это так называемые модели ограниченной рациональности ([18]), которые представляют основной интерес экспериментальной экономики.

Для 2-го класса в [14, 19] предложена модель level- k (k -й уровень), в которой игрокам приписываются уровни размышлений – ранги рефлексии. Игроки 0-го уровня выбирают действия случайно равномерно или однократно удаляют доминируемые действия, игрок k ранга считает, что все его оппоненты имеют $(k-1)$ -й ранг, и действует, выбирая наилучший ответ на предполагаемые действия оппонентов.

Далее была предложена модель Cognitive Hierarchy (когнитивная иерархия, СН) [5], в которой ранг игрока фиксирован и является реализацией случайной величины распределения Пуассона. Игрок k -го ранга считает, что ранг его оппонентов от 0 до $(k-1)$ (нормализованное распределение Пуассона).

Параллельно с этим развивалась модель квантового наилучшего ответа QBR [15], идея которой в том, что люди совер-

шают ошибки тем больше, чем меньше эти ошибки стоят. Stahl и Whilson [20] совместили модели level-k и QBR: предложили в модели level-k вместо наилучшего ответа использовать QBR. В [22] была использована та же идея, только вместо модели level-k была взята СН, что дало эффект – модель QСН эффективнее описывает поведение людей в экспериментах. Далее работа [23] показывает, что небольшое смещение распределения Пуассона, лежащего в основе СН, также плодотворно, предложенная модель Spike-Poisson QСН (QСН со смещённым распределением Пуассона) показала большую эффективность.

В подобных исследованиях модель игрока 0-го ранга была равномерным распределением над действиями (за редким исключением). В работе [24] было предложено изменить модель игроков 0-го ранга на модели 3-го класса, что дало значительный прирост описательной силы моделей.

В [13] была описана общая модель на основе параллельно развивавшейся идеи стратегической рефлексии [1], где принадлежность игроков к рангам является управляемым параметром модели. Акцент на управлении в данной модели объясняется, во-первых, её развитием как части теории управления организационными системами, во-вторых, из литературы по психологии и поведению известно (примеры есть в [1]), что на модель стратегической рефлексии человека можно целенаправленно влиять сообщением определённой информации, поэтому возможны постановки задачи рефлексивного управления, а не только рефлексивной идентификации, как в других моделях этого класса.

Это ключевые модели стратегического поведения, с помощью которых описывают поведение игроков на первом шаге (с некоторым успехом на нескольких первых шагах).

При переходе к последующим шагам у игрока появляется история игры, которую можно использовать для корректировки поведения или обучения.

Исторически одной из первых моделей здесь была модель Курно [8], в которой предполагалось, что, выбирая своё действие на очередном шаге, игрок считает, что оппоненты не помнят свои действия и выбирает наилучший ответ на действия

оппонентов в прошлом шаге, таким образом, это статическая модель ответа на динамическую ситуацию.

Следующая широко известная модель – модель фиктивной игры [3, 16] (Fictitious Play, FP). Здесь игрок формирует модель поведения оппонентов как случайную величину с эмпирической функцией распределения, наблюдая их действия на предыдущих шагах. Далее выбирается наилучший ответ – действие, приносящее максимальный ожидаемый выигрыш при данном поведении оппонента. Эта модель уже опирается на идею обучения, правда, остаётся некая «статичность» в понимании оппонентов – использование эмпирической функции распределения подразумевает, что оппонент не меняет своего поведения.

Две данные модели являются моделями на основе представлений (beliefs-based) – игроки формируют представления о поведении оппонентов и на основе этого выбирают своё поведение. Кроме перечисленных выше моделей к этому классу принадлежат также модели [10, 11, 7], которые являются различными обобщениями моделей Курно и FP для преодоления их слабых сторон.

Параллельно развивались модели, не основанные на представлениях, а развивавшиеся на идеях обучения с подкреплением (reinforcement learning, RL). Идея обучения с подкреплением в том, что игрок смотрит не на поведение других игроков, а на свой выигрыш от выбранных действий и более вероятно выберет такое действие, которое давало ему больший выигрыш в прошлом, – эта идея «выросла» в области принятия индивидуальных решений [21] и психологии [17].

В данных моделях игроку не нужно знать информацию об остальных игроках, при достаточных предположениях знание только своего выигрыша от истории игры позволяет корректировать выбор действия на следующем шаге и находить оптимальную стратегию, по крайней мере, в пределе по шагам. Примеры моделей данного класса – [17, 6].

В работе [4] построена гибридная модель поведения EWA (experience weighted attractions) с шестью свободными параметрами, показаны значения параметров, при которых модель сводится к чисто belief-based или RL-моделям. Предложено обсуждение качественного значения свободных параметров модели.

В [12] в связи с критикой большого числа свободных переменных модели предложены фиксированные значения для трёх параметров модели и функциональные зависимости, определяющие значения двух свободных параметров от истории игры. Таким образом, количество свободных параметров сведено до одного. Показано тем не менее, что такая модель может хорошо описывать существующие данные поведения людей.

Наконец, одна из более новых моделей – модель IEL [2], предложена для отдельного случая континуума возможных действий игроков. В ней выбор происходит также из дискретного набора действий, элементы которого каждый шаг могут с заданной вероятностью быть заменены элементом из исходного континуального множества действий игрока. Накопление величины «подкрепления» происходит другим способом: выборка двух произвольных действий, дублирование более успешного действия и удаление менее успешного. Именно поэтому модель имеет в своём названии слово «эволюционная».

3. Заключение

Рассмотрены модели стратегического поведения, применяемые в экспериментальной экономике для описания поведения игроков в начале игры и в её продолжении для повторяющихся игр. Первые модели опираются на ограниченную рациональность игроков, вторые – на их обучение от истории игры. Для игр с континуумом действий у игроков найдена одна модель поведения, основанная на идеях эволюционных моделей, хотя было бы естественнее обнаружить расширение незволюционных моделей поведения в конечных играх на случай континуума действий игроков. В свою очередь, для конечных игр эволюционные модели поведения не очень популярны (области их приложения см. в [2]).

Эффективность данных моделей для описания поведения людей в повторяющихся играх на настоящее время подтверждена экспериментально во многих работах. Эти модели продолжают служить объектом изучения и идентификации в экспериментальной экономике и инструментом анализа поведения людей в экономических ситуациях.

Литература

1. НОВИКОВ Д.А., ЧХАРТИШВИЛИ А.Г. *Прикладные модели информационного управления*. – М., 2004.
2. ARIFOVIC J., LEDYARD J. *A behavioral model for mechanism design: Individual evolutionary learning* // Journal of Economic Behavior & Organization. – 2011. – Т. 78. – № 3. – С. 374–395.
3. BROWN G.W. *Iterative solution of games by fictitious play* // Activity analysis of production and allocation. – 1951. – Т. 13. – № 1. – С. 374–376.
4. CAMERER C., HUA HO T. *Experience-weighted attraction learning in normal form games* // Econometrica. – 1999. – Т. 67. – № 4. – С. 827–874.
5. CAMERER C.F., HO T.H., CHONG J.K. *A cognitive hierarchy model of games* // The Quarterly Journal of Economics. – 2004. – 119(3). – P. 861–898.
6. CHEN Y., TANG F.F. *Learning and incentive-compatible mechanisms for public goods provision: An experimental study* // Journal of Political Economy. – 1998. – Т. 106. – № 3. – С. 633–662.
7. CHEUNG Y.W., FRIEDMAN D. *Individual learning in normal form games: Some laboratory results* // Games and Economic Behavior. – 1997. – Т. 19. – № 1. – С. 46–76.
8. COURNOT A.A. *Recherches sur les Principes Mathematiques de la Theorie de Richesses*. 1838 / Translated by N.T. Bacon, Researches into the mathematical principles of the theory of wealth. – London: Hafner, 1960.
9. CRAWFORD V.P., COSTA-GOMES M.A., IRIBERRI N. *Structural models of nonequilibrium strategic thinking: Theory, evidence, and applications* // Journal of Economic Literature. – 2013. – Т. 51. – № 1. – С. 5–62.
10. FUDENBERG D., LEVINE D.K. *The theory of learning in games* // MIT press. – 1998. – Т. 2.
11. HEALY P.J. *Learning dynamics for mechanism design: An experimental comparison of public goods mechanisms* // Journal of Economic Theory. – 2006. – Т. 129. – № 1. – С. 114–149.

12. HO T.H., CAMERER C.F., CHONG J.K. *Self-tuning experience weighted attraction learning in games* // Journal of Economic Theory. – 2007. – Т. 133. – № 1. – С. 177–198.
13. KOREPANOV V.O., NOVIKOV D.A. *The reflexive partitions method in models of collective behavior and control* // Automation and Remote Control. – 2012. – Т. 73. – № 8. – С. 1424–1441.
14. NAGEL R. *Unraveling in guessing games: An experimental study* // The American Economic Review. – 1995. – Т. 85. – № 5. – С. 1313–1326.
15. MCKELVEY R.D., PALFREY T.R. *Quantal response equilibria for normal form games* // Games and economic behavior. – 1995. – 10(1). – С. 6–38.
16. ROBINSON J. *An iterative method of solving a game* // Annals of mathematics. – 1951. – С. 296–301.
17. ROTH A.E., EREV I. *Learning in extensive-form games: Experimental data and simple dynamic models in the intermediate term* // Games and economic behavior. – 1995. – Т. 8. – № 1. – С. 164–212.
18. SELTEN R. *Features of experimentally observed bounded rationality* // European Economic Review. – 1998. – Т. 42. – № 3. – С. 413–436.
19. STAHL D.O., WILSON P.W. *Experimental evidence on players' models of other players* // Journal of economic behavior & organization. – 1994. – Т. 25. – № 3. – С. 309–327.
20. STAHL D.O., WILSON P.W. *On players' models of other players: Theory and experimental evidence* // Games and Economic Behavior. – 1995. – Т. 10. – № 1. – С. 218–254.
21. SUTTON R.S., BARTO A.G. *Reinforcement learning: An introduction*. – 2011.
22. WRIGHT J.R., LEYTON-BROWN K. *Behavioral game theoretic models: a Bayesian framework for parameter analysis* // Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Vol. 2: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2012. – С. 921–930.
23. WRIGHT J.R., LEYTON-BROWN K. *Predicting human behavior in unrepeated, simultaneous-move games* // arXiv preprint arXiv:1306.0918. – 2013.

24. WRIGHT J.R., LEYTON-BROWN K. *Level-0 meta-models for predicting human behavior in games* // Proceedings of the fifteenth ACM conference on Economics and computation. – ACM, 2014. – С. 857–874.

MODELS OF PLAYERS' BEHAVIOR OF EXPERIMENTAL GAME THEORY

Vsevolod Korepanov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc. (vkorepanov@ipu.ru).

Abstract: The paper gives a brief review of behavior models of people used in the experimental game theory. The main model of the game in this area is a repeated game of n persons, which, according to the history, can be divided into the first step and the subsequent ones. Accordingly, the models are divided into those that use only the description of the game and those that use the description of the game and history.

Keywords: behavior models, strategic behavior models, strategic reflection, learning models, experimental game theory, experimental economics.

УДК 62.50
ББК 30

УСТОЙЧИВОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВИХРЕВОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА¹

Рассадин Ю.М.², Шинкарюк А.Г.³

(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
РАН, Москва)

В данной работе исследована устойчивость модифицированного вихревого алгоритма, реализованного на основе теории скользящих режимов по методу эквивалентного управления. В качестве объекта управления рассмотрен класс многозвенных манипуляторов как классический пример электромеханической системы. Вихревые алгоритмы в отличие от классических подходов к синтезу разрывного управления обеспечивают асимптотическую инвариантность к внешним несогласованным возмущениям, которые всегда присутствуют в задачах управления электромеханическими системами, так как являются естественным следствием структуры объекта. Устойчивость замкнутой системы анализировалась методами Ляпунова.

Ключевые слова: робот-манипулятор, вихревой алгоритм, задача слежения, инвариантность.

1. Введение

Наиболее широко применяемыми методами синтеза обратной связи в электромеханических системах являются различные вариации скользящих режимов. Такие их преимущества, как

¹ Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ в проекте 15-08-01543-А и Министерства образования РФ в рамках гранта Президента РФ МД-5366.2016.8.

² Рассадин Юрий Михайлович, ст. математик (rassadin@ipu.ru).

³ Шинкарюк Алла Георгиевна, математик (Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. (495) 334-93-21).

понижение динамического порядка замкнутой системы, робастность, простота процедуры синтеза, а также современные характеристики ключевых преобразователей мощности, достигающие частот переключения в 100 kHz, определяют их применимость и, как следствие, популярность. Также системы, функционирующие в скользящих режимах, инвариантны к согласованным ограниченным внешним возмущениям. К сожалению, даже простейший случай двухзвенного манипулятора приводит к несогласованным по отношению к исполнительным устройствам возмущениям. Проблемы подавления возмущения подобного рода активно обсуждаются в [9, 10]. Теоретической же основой данной работы являются вихревые алгоритмы, описанные в [2]. Вихревые алгоритмы обеспечивают асимптотическую инвариантность замкнутой системы к несогласованным возмущениям, которые предполагаются непрерывными функциями времени второго класса гладкости на протяжении всего рассматриваемого времени работы объекта.

Основной целью данной работы было исследование сходимости для статического закона обратной связи [11] с постоянной амплитудой разрывного управления, который бы обеспечивал инвариантность к несогласованным возмущениям [7]. Статические законы обратной связи известны как одни из простейших в применении, а также позволяют снизить вычислительную нагрузку на управляющее устройство, так как не расширяют пространство состояний и не используют итерационных процедур наблюдения или идентификации.

Дальнейшее изложение строится следующим образом. В разделе «Постановка задачи» вводится математическая модель объекта и обсуждается конечная цель управления. Во втором разделе рассматривается кандидат в функции Ляпунова – полная кинетическая энергия манипулятора. Предлагаются возможная модификация закона управления и модификация функции Ляпунова. В результате получены неравенства, определяющие выбор коэффициентов обратной связи, обеспечивающие требуемую точность управления. В разделе «Численный эксперимент» сходимость алгоритмов иллюстрируется результатами компьютерного моделирования плоского двухзвенного манипулято-

ра с неизвестными внешними возмущениями по методу Эйлера. Далее приведены результаты сравнения с существующими классическими подходами к синтезу обратной связи для подобного рода систем. В заключение обозначены основные достигнутые результаты, подчеркнуты некоторые уязвимые места в рассуждениях и предложено направление дальнейших исследований.

2. Постановка задачи

Математическая модель плоского многозвенного манипулятора с электродвигателями постоянного тока в качестве исполнительных устройств может быть описана следующей системой уравнений [2, 5, 8]:

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 &= q_2, \\ (1) \quad \dot{q}_2 &= H^{-1}(q_1)(v - C(q_1, q_2)q_2 - G(q_1) + \eta(t)), \\ \dot{v} &= -Av - Dq_2 + Bu, \end{aligned}$$

где $q_1, q_2 \in \mathfrak{R}^n$ – векторы углов ориентации звеньев и соответствующих угловых скоростей, n – количество звеньев манипулятора, $H(q_1)$ – тензор инерции манипулятора, положительно определённая нелинейная симметричная матрица, $C(q_1, q_2)$ – матрица центробежных и кориолисовых сил, $G(q_1) \in \mathfrak{R}^n$ – вектор гравитационных сил и $v \in \mathfrak{R}^n$ – вектор обобщённых моментов сил, развиваемых исполнительными устройствами, u – конечные управляющие воздействия. Все сочленения манипулятора полагаются вращательными с индивидуальными приводами. Параметры двигателей постоянного тока содержатся в $A, D, B \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ диагональных матрицах с положительными постоянными коэффициентами переноса. Все параметры двигателей полагаются известными и постоянными. В данной работе рассмотрена задача слежения [5] за заданной траекторией как обобщающая постановка для задач стабилизации и регулирования. В качестве объекта управления был выбран многозвенный (n сочленений) плоскостной манипулятор. Предполагается, что на объект могут воздействовать внешние возмущения широкого класса. Вызовом

в данной постановке является обеспечение асимптотической инвариантности посредством статического закона обратной связи, имеющего разрывной характер с постоянной амплитудой, т.е. устремление к нулю компонент вектора невязок углов ориентации $(e_1 = q_1 - q_{1d}) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, причём момент нагрузки не известен и может значительно изменяться во время работы системы. Предполагается, что внешние возмущения $\eta(t)$ и желаемые траектории $q_{1d}(t) \in \mathfrak{X}^n$ ограничены и могут быть описаны функциями из класса гладкости C^3 . Такие ограничения определяются применением вихревых алгоритмов, возникают и описаны конструктивно, в процессе синтеза обратной связи.

3. Кинетическая энергия как кандидат в функции Ляпунова

Формулы На первом этапе рассмотрим модель робота-манипулятора без учёта динамики исполнительных устройств:

$$(2) \quad \begin{aligned} \dot{q}_1 &= q_2, \\ \dot{q}_2 &= H^{-1}(q_1)(v - C(q_1, q_2)q_2 - G(q_1) + \eta(t)), \end{aligned}$$

где $q_1, q_2 \in \mathfrak{X}^n$ – векторы углов ориентации звеньев и соответствующих угловых скоростей, $H(q_1)$ – тензор инерции манипулятора, положительно определённая нелинейная симметричная матрица, $C(q_1, q_2)$ – матрица центробежных и кориолисовых сил, $G(q_1) \in \mathfrak{X}^n$ – вектор моментов гравитационных сил, $v \in \mathfrak{X}^n$ – вектор обобщённых моментов сил, развиваемых исполнительными устройствами.

В соответствии с вихревыми алгоритмами закон управления выбирается в виде

$$(3) \quad v = -\alpha q_2 - M \text{sign}(q_1).$$

В работе [6] в качестве функции Ляпунова используется кинетическая энергия установки. В терминах уравнений (2) кинетическую энергию манипулятора можно записать так:

$$V_1 = \frac{1}{2} q_2^T H(q_1, q_2) q_2.$$

Продифференцируем по времени:

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{2} q_2^T \dot{H}(q_1, q_2) q_2 + q_2^T H(q_1, q_2) \dot{q}_2.$$

С учётом (2) и (3), а также приняв во внимание, что матрица $\dot{H} - 2C(q_1, q_2)$ – кососимметрическая, перепишем:

$$\dot{V}_1 = -\alpha q_2^T q_2 - q_2^T (M \text{sign}(q_1) + G(q_1) + \eta(t)).$$

Для того чтобы скомпенсировать слагаемое $M \text{sign}(q_1)$, введём в функцию Ляпунова дополнительное слагаемое $M |q_1|$, производная по времени для которого равна $M \text{sign}(q_1)^T q_2$. Тогда второе приближение для функции Ляпунова $V_2 = V_1 + M |q_1|$. Производная по времени тогда принимает вид

$$\dot{V}_2 = -\alpha q_2^T q_2 - q_2^T (G(q_1) + \eta(t)).$$

Если модифицировать закон обратной связи по принципу «комбинированного управления», чтобы прямым вычитанием, скомпенсировать вектор гравитационных сил $G(q_1)$, т.е. назначить

$$(4) \quad \tau = -\alpha q_2 - M \text{sgn}(q_1) + G(q_1),$$

то функция Ляпунова принимает вид

$$\dot{V}_2 = -\alpha q_2^T q_2 - q_2^T \eta(t),$$

из которого видно, что от выбора коэффициента α зависит размер области устойчивости траекторий системы (2). Так как для внешних возмущений выполняется оценка $|\eta(t)| \leq N \forall t$, то для производной функции Ляпунова можно записать:

$$\dot{V}_2 \leq -\alpha |q_2|^2 + N |q_2|,$$

т.е. внутри области $|q_2| \leq N/\alpha$ данная функция – кандидат в функции Ляпунова не гарантирует асимптотической сходимости замкнутой системы (2)–(4), и можно утверждать лишь, что закон управления гарантирует инвариантность с заданной точностью, которая зависит от коэффициента α .

Тем не менее дополнительное слагаемое в законе обратной связи влечёт за собой повышение расхода энергии. Добавив в функцию Ляпунова дополнительное слагаемое, а именно

разницу между максимумом потенциальной энергии манипулятора и его конкретным значением $P_{\max} - P(q_1)$, которое по определению всегда положительно, можно скомпенсировать слагаемое $q_2^T G(q_1)$ в выражении для \dot{V} . Действительно, производная по времени от потенциальной энергии – мощность, затрачиваемая на работу против гравитационного поля Земли, равная скалярному произведению вектора гравитационных моментов $G(q_1)$ и вектора угловых скоростей звеньев q_2 .

4. Численный эксперимент

Численный эксперимент – стандартная процедура первичной проверки выдвинутых гипотез и инструмент демонстрации преимуществ предложенных подходов. В современных условиях исследователям доступны самые широкие возможности моделирования объектов, различные техники параллельных вычислений, варианты конечно-разностных аппроксимаций по своему числу приближаются к звёздам на небе. Тем не менее до сих пор не теряют актуальности задачи, для которых наиболее подходящим является метод Эйлера, явная схема первого порядка точности.

Одна из таких задач – симуляция скользящих режимов. Причина этого кроется в разрывном характере управляющего сигнала и, как следствие, неэффективность более сложных методов, например схем «предиктор–корректор». Метод Эйлера органичен для скользящих режимов ещё и тем, что величина шага по времени соответствует конечной частоте переключений реального исполнительного устройства.

Двухзвенный манипулятор был выбран объектом эксперимента. Параметры объекта были устроены на следующих значениях: $l_1 = 1$ м, $l_c = 0,3$ м, $l_2 = 1$ м, $l_{2c} = 0,5$ м, $m_1 = m_2 = 1$ кг. Матрицы параметров исполнительных устройств, двигателей постоянного тока, имели значения $A = \text{diag}(464,9)$, $D = \text{diag}(2,2)$, $B = \text{diag}(34,6)$. На рис. 1 изображены углы ориентации звеньев, совмещённые с желаемыми траекториями, а также соответствующие невязки. На рис. 2 показаны обобщённые моменты, развиваемые исполнительными устройствами, совмещённые с желаемыми траекториями и соответствующие невязки.

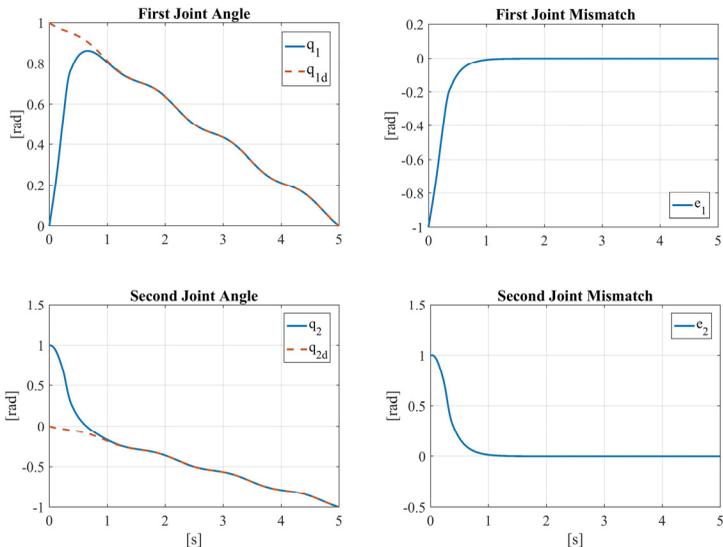


Рис. 1. Углы ориентации звеньев, желаемые траектории углов и соответствующие невязки

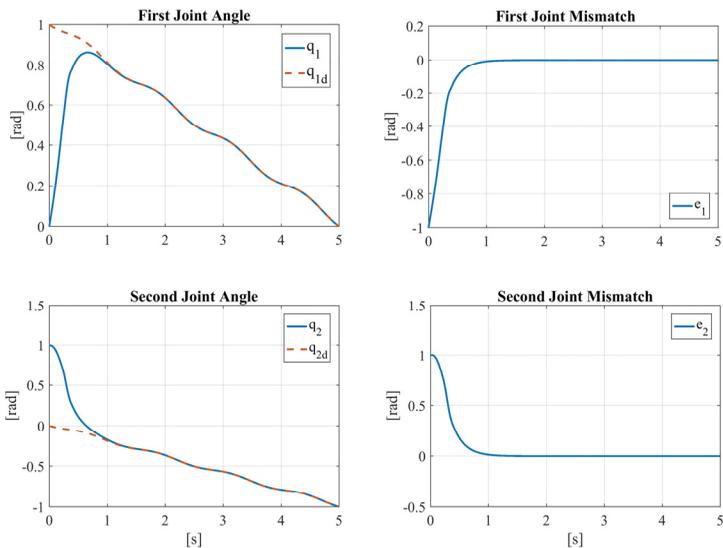


Рис. 2. Обобщённые моменты, желаемые траектории моментов и соответствующие невязки

5. Сравнение с существующими методами

Для сравнения с предложенным методом синтеза были выбраны две наиболее распространённые техники: глубоких обратных связей и традиционных скользящих режимов. На рис. 3 представлены сравнительные результаты численного моделирования для названных выше методов синтеза и предложенного в работе модифицированного скользящего режима на вихревом алгоритме. Шаг по времени был выбран равным 1^{-5} с. Графический анализ показывает, что ошибка слежения пропорциональна шагу по времени только для случая вихревого алгоритма. В системах, где был использован линейный закон обратной связи или скользящий режим, не удалось подавить внешнее несогласованное возмущение $\eta(t)$, амплитуда невязки на два порядка больше шага по времени.

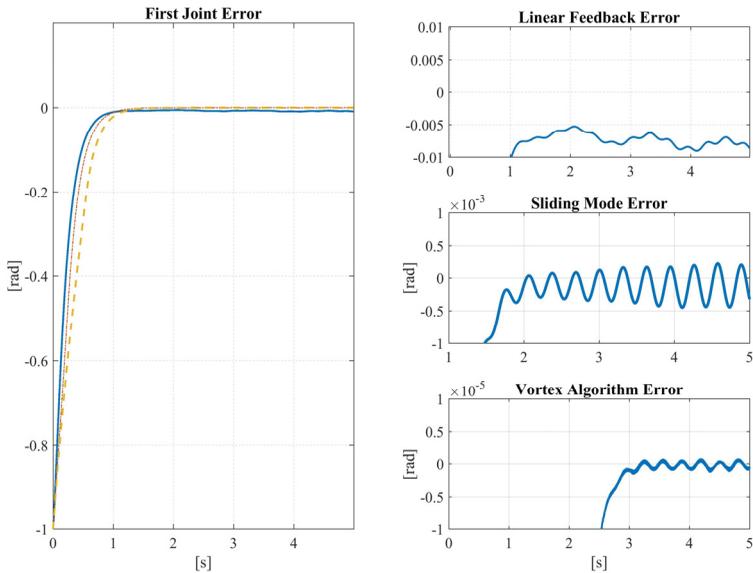


Рис. 3. Результаты сравнительного моделирования

6. Заключение

В данной работе была рассмотрена проблема обеспечения инвариантности к внешним несогласованным возмущениям широкого класса в задаче слежения для плоскостного многозвенного манипулятора. Ограничения для возмущений накладывались только на класс гладкости описывающих их функций. Получены они были конструктивно, в процессе синтеза обратной связи, на основе условий возникновения скользящего режима. Сами возмущения, таким образом, полагались неизвестными, но ограниченными на времени работы объекта.

Обеспечение робастности замкнутой системы может являться предметом дальнейших исследований. Учитывая тот факт, что в качестве возмущений могут также рассматриваться слагаемые, зависящие от переменных состояния системы, стоит выделить в отдельную проблему ограничения сверху на амплитуду управления. Дело в том, что уравнения для производных первого или более высоких порядков по времени от таких возмущений будут содержать реальное управление. Одновременно норма таких производных должна быть ограничена, и это обстоятельство связывает верхнюю границу для амплитуды управления и оценку нормы возмущений.

Литература

1. ЗЕНКЕВИЧ С.Л., ЮЩЕНКО А.С. *Основы управления манипуляционными роботами*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
2. КОЧЕТКОВ С.А., УТКИН В.А. *Инвариантность в системах с несогласованными возмущениями* // *АиТ*. – 2013. – № 7. – С. 46–83.
3. КОЧЕТКОВ С.А., РАССАДИН Ю.М., ШИНКАРЮК А.Г. *Задача слежения для плоского двухзвенного робота-манипулятора при воздействии внешних возмущений широкого класса* // *Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого): материалы 13-й Междунар. конф.* – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2016. – С. 203–205.
4. КРАСНОВА С.А., УТКИН В.А., УТКИН А.В. *Блочный синтез систем управления роботами-манипуляторами в условиях неопределенности*. – М.: Ленанд, 2014. – 208 с.

5. *Построение систем программного движения* / А.С. ГАЛИУЛЛИН, И.А. МУХАМЕТЗЯНОВ, Р.Г. МУХАРЛЯМОВ, В.Д. ФУРАСОВ. – М.: Наука, 1971.
6. ПЯТНИЦКИЙ Е.С. Управление черным ящиком механической природы // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 3. – С. 202–212.
7. УТКИН В.И. *Скольльзящие режимы в задачах оптимизации и управления*. – М.: Наука, 1981.
8. ЧИЛИКИН М.Г., КЛЮЧЕВ В.И., САНДЦЕР А.С. *Теория автоматизированного электропривода*. – М.: Энергия, 1979.
9. ESTRADA A., FRIDMAN L. *Quasi-continuous HOSM control for systems with unmatched perturbations* // Automatica. – 2010. – 46. – P. 1916–1919.
10. LOUKIANOV A.G. *Robust block decomposition sliding mode control design* // Mathematical Problems in Engineering. – 2002.
11. SUNG S.W., LEE J., LEE I.-B. *Relay Feedback Methods* // Process Identification and PID Control. Wiley-IEEE Press. – 2009. – P. 345–372.

STABILITY OF MODIFIED VORTEX ALGORITHM FOR FLAT MANIPULATOR

Yury Rassadin, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, senior mathematician (rassadin@ipu.ru).

Alla Shinkaryuk, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, (495)334-93-21).

Abstract: In this paper we investigate the stability of the modified vortex algorithm implemented by the method of equivalent control and the theory of sliding modes. As the control plant a class of multilink manipulators is considered, as a classic example of electromechanical systems. Classical discontinuous control, in contrast to vortex algorithms, can not provide asymptotic invariance to external unmatched disturbances that are always present in problems of control of electromechanical systems because they are a natural consequence of the structure of these objects. The stability of the closed loop system were analyzed by Lyapunov methods.

Keywords: robot-manipulator, vortex algorithm, tracking problem, invariance.

УДК 021.8 + 025.1
ББК 78.34

МИНИМИЗАЦИЯ НОРМЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ЗАДАЧАХ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Берсенев Н.В.¹, Уткин В.А.²

(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
РАН, Москва)

В работе предложены алгоритмы оптимизации выбора спектра замкнутой системы и обратной связи в задачах модального управления в многомерных линейных системах по критерию минимума нормы матрицы обратной связи.

Ключевые слова: модальное управление, линейные системы, оптимальное управление.

1. Введение

Задача модального управления, состоящая в назначении заданных корней замкнутой системы с помощью выбора линейной обратной связи, давно известна, достаточно полно изучена и широко используется в теории и практике управления [1, 6]. Однако задача выбора самого спектра замкнутой системы до сих пор остаётся открытой темой для исследования.

Известны несколько подходов к оптимизации выбора матрицы обратной связи в задаче модального управления. Одним из них является оптимизация по норме матрицы обратной связи [8, 9].

В данной работе ставится задача минимизации нормы Фробениуса матрицы обратной связи в задаче модального управления при заданной скорости сходимости. Основное отличие рассматриваемой здесь задачи от известных работ [4, 7] состоит в том, что спектр замкнутой системы не задан, а выбирается в процессе процедуры оптимизации.

¹ Берсенев Никита Владимирович, математик (nick.e-note@yandex.ru).

² Виктор Анатольевич Уткин, доктор технических наук, профессор (Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. (495) 334-93-21).

Работа имеет следующую структуру. В разделе 2 рассмотрены основные аспекты проблемы модального управления и приведена постановка задачи исследования, в разделе 3 рассматривается алгоритм решения поставленной задачи в общем виде, а также аналитическое решение задачи для случая системы второго порядка. Эффективность алгоритма оптимизации продемонстрирована на численных примерах.

2. Постановка задачи

2.1. ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Рассматривается линейная многомерная стационарная система вида

$$(1) \quad \dot{x} = Ax + Bu, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad u \in \mathbb{R}^m,$$

где x, u – векторы состояния и управления, A и B – матрицы с постоянными коэффициентами соответствующих размерностей, $\text{rang } B$ – полный, пара матриц (A, B) – управляема.

Ставится задача стабилизации системы (1) с помощью линейной обратной связи

$$(2) \quad u = Fx$$

с заданным спектром замкнутой системы

$$(3) \quad \sigma(A + BF) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\},$$

где F – матрица обратной связи, $\sigma(\cdot)$ – спектр соответствующей матрицы, λ_i – её собственные значения. Спектр имеет отрицательные действительные части, причем каждое собственное число с ненулевой мнимой частью включается в него вместе со своим комплексно-сопряженным числом.

Существование такой обратной связи гарантируется выполнением условия управляемости системы (1).

2.2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Применительно к системе (1) ставится задача минимизации критерия

$$(4) \quad \|F\| = \text{tr}(FF^T) \rightarrow \min$$

при заданной скорости сходимости замкнутой системы

$$(5) \quad \sigma(A + BF) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}: \text{Re } \lambda_i \leq -\sigma, \quad \sigma > 0.$$

3. Блочный синтез

3.1. ПУТЬ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБЩЕГО ВИДА

Управляемая система общего вида (1) может быть приведена к блочной форме управляемости:

$$(6) \quad \begin{aligned} \dot{x}_r &= A_{rr}x_r + B_r x_{r-1}, \\ \dot{x}_i &= \sum_{j=i+1}^r A_{ij}x_j + A_{ii}x_i + B_i x_{i-1}, \end{aligned}$$

где

$$\dot{x}_0 = \sum_{j=1}^r A_{0j}x_j + A_{00}x_0 + B_0 u,$$

$$(7) \quad \dim x_i = \text{rank} B_i = m_i, \sum_{i=0}^r m_i = n,$$

с помощью ортогонального преобразования $x = Tx$ [2, 3]. Так как при ортогональном преобразовании норма Фробениуса любой матрицы остаётся неизменной, задачи оптимизации обратной связи в исходной и преобразованной системах эквивалентны [5].

Используя блочный подход, последовательно назначим фантомные собственные значения $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \in C$ замкнутой системы:

$$(8) \quad \dot{\tilde{x}} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \tilde{a}_{1,1} & \dots & \tilde{a}_{1,n-1} \\ 0 & \lambda_2 & \dots & \tilde{a}_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \lambda_n \end{pmatrix} \tilde{x}.$$

Выразим λ_i через компоненты обратной связи F и наложим условия действительности компонентов обратной связи:

$$(9) \quad \text{Im } F_{i,j} = 0.$$

Это условие обеспечивает действительность или попарную комплексную сопряженность собственных значений замкнутой системы.

Найдём условный минимум нормы обратной связи:

$$(10) \quad \begin{cases} \|F\| = \text{tr}(FF^T) \rightarrow \min \\ \text{Im } F_{ij} = 0 \\ \text{Re } \lambda_i(F) \leq -\sigma, \forall i = \overline{1, n} \end{cases}$$

3.2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Рассмотрим управляемую систему 2-го порядка со скалярным управлением:

$$(11) \quad \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} u.$$

С помощью ортогонального преобразования приведем систему (7) к виду

$$(12) \quad \begin{pmatrix} \dot{\bar{x}}_1 \\ \dot{\bar{x}}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix} u,$$

где $\bar{a}_{12} \neq 0, b \neq 0$. Выберем обратную связь:

$$(13) \quad u = Fx = \begin{pmatrix} f_1 & f_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{pmatrix},$$

так, чтобы обеспечить заданную скорость стабилизации (5) системы. На основе БФУ назначим фантомные комплексные собственные числа λ_1, λ_2 замкнутой системы:

Сделаем замену переменных:

$$(14) \quad \tilde{x}_2 = (\bar{a}_{11} - \lambda_1)x_1 + \bar{a}_{12}x_2, u = (\bar{a}_{11} - \lambda_1)x_1 + \bar{a}_{12}x_2.$$

Тогда система примет вид:

$$(15) \quad \begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 &= \lambda_1 \bar{x}_1 + \tilde{x}_2, \\ \dot{\bar{x}}_2 &= ((\bar{a}_{11} - \lambda_1)(\lambda_1 - \bar{a}_{22} - bf_2) + \bar{a}_{12}(\bar{a}_{21} + bf_1))\bar{x}_1 + \\ &+ (\bar{a}_{11} - \lambda_1 + \bar{a}_{22} + bf_2)\tilde{x}_2. \end{aligned}$$

Выберем обратную связь:

$$(16) \quad \begin{aligned} bf_1 &= (\bar{a}_{11}(\lambda_1 + \lambda_2)) - \lambda_1\lambda_2 - \bar{a}_{11}^2 - \bar{a}_{12}\bar{a}_{21})/\bar{a}_{12}, \\ bf_2 &= \lambda_1 + \lambda_2 - \bar{a}_{11} - \bar{a}_{21}. \end{aligned}$$

Потребуем, чтобы компоненты вектора обратной связи были действительными, тем самым обеспечив условие действительности или комплексной сопряженности собственных чисел замкнутой системы.

$$(17) \quad \text{Im } f_1 = \text{Im } f_2 = 0.$$

Таким образом, задача минимизации нормы вектора обратной связи в системе (12) с ограничениями (5) сводится к задаче Лагранжа:

$$(18) \quad \begin{cases} f_1^2 + f_2^2 \rightarrow \min, \\ \text{Im } f_1, \text{Im } f_2 = 0, \\ \text{Re } \lambda_1, \text{Re } \lambda_2 \leq -\sigma. \end{cases}$$

Пусть $\lambda_1 = a + ib$, $\lambda_2 = c + id$. Тогда система (18) примет вид:

$$(19) \quad \begin{cases} \|F\| \rightarrow \min, \\ (a - c)d = 0, \\ b = -d, \\ a \leq -\sigma, \\ c \leq -\sigma, \end{cases}$$

где

$$(20) \quad \|F\| = (\bar{a}_{11}(a + c + i(b + d))) - (a + ib)(c + id) - \bar{a}_{11}^2 - \bar{a}_{12}\bar{a}_{21})^2 / \bar{a}_{12}^2 + (a + c + i(b + d) - \bar{a}_{11} - \bar{a}_{21})^2.$$

Решим эту задачу аналитически.

1) Первым шагом отбросим условия заданной скорости сходимости и найдём условный минимум нормы обратной связи во всём пространстве собственных чисел:

$$(17) \quad \begin{cases} \frac{\partial}{\partial a} \|F\| = 0, \frac{\partial}{\partial b} \|F\| = 0, \\ \frac{\partial}{\partial c} \|F\| = 0, \frac{\partial}{\partial d} \|F\| = 0, \\ (a - c)b = 0, \\ b = -d, \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} (\bar{a}_{11}(a+c) - ac + bd - \bar{a}_{11}^2 - \bar{a}_{12}\bar{a}_{21}) = 0, \\ a+c - \bar{a}_{11} - \bar{a}_{22} = 0, \\ (a-c)b = 0, \\ b = -d, \\ \begin{cases} b = d = 0, \\ a = c, \end{cases} \\ (2a\bar{a}_{11} - a^2 - \bar{a}_{11}^2 - \bar{a}_{12}\bar{a}_{21})(\bar{a}_{11} - a) / \bar{a}_{12}^2 + 2a - \bar{a}_{11} - \bar{a}_{22} = 0. \end{cases}$$

Первая система имеет своими корнями собственные значения системы при нулевом управлении. Если они лежат в области $a, c \leq -\sigma$, это абсолютный минимум нормы обратной связи, и задача решена.

Вторая система имеет одну или несколько пар равных действительных корней. Если они лежат в $a, c \leq -\sigma$, то они – возможные решения задачи.

2) Следующим шагом будем искать экстремумы нормы обратной связи на границе области заданной скорости сходимости. Так как уравнения симметричны относительно перестановки переменных, достаточно рассмотреть случай $a = -\sigma$.

$$(18) \quad \begin{cases} \frac{\partial}{\partial c} \|F\| = 0, \\ \frac{\partial}{\partial b} \|F\| = 0, \Leftrightarrow \\ (c + \sigma)d = 0, \\ b = -d, \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} (\bar{a}_{11}c - \bar{a}_{11}\sigma + \sigma c - \bar{a}_{11}^2 - \bar{a}_{12}\bar{a}_{21})(\bar{a}_{11} + \sigma) / \bar{a}_{12}^2 + c - \sigma - \bar{a}_{11} - \bar{a}_{22} = 0, \\ b = d = 0. \end{cases}$$

Если первое уравнение имеет корень $c \leq -\sigma$, пара собственных чисел $\lambda_1 = -\sigma, \lambda_2 = c$ – возможное решение задачи.

Третьим шагом найдём экстремум выражения (16) в точке $a, c = -\sigma$.

$$(19) \quad \begin{cases} \frac{\partial}{\partial b} \|F\| = 0 \\ b = -d \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} b = d = 0 \\ b^2 = -\bar{a}_{11}^2 - \bar{a}_{21}\bar{a}_{22} - 2\bar{a}_{21}\sigma - \sigma^2 \end{cases}$$

Если второе уравнение имеет решения $\pm b$, то возможным решением задачи будет $\lambda_1 = -\sigma + b$, $\lambda_2 = -\sigma - b$, в противном случае: $\lambda_1 = -\sigma$, $\lambda_2 = -\sigma$.

Для всех отобранных возможных решений задачи вычисляется норма вектора обратной связи и выбирается оптимальное.

3.3. ЧИСЛЕННЫЕ ПРИМЕРЫ

Рассмотрим несколько примеров:

$$1) \quad \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 4 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u, \lambda_1^s = -4, \lambda_2^s = 1.$$

$$2) \quad \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -10 & -11 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u, \lambda_1^s = -10, \lambda_2^s = -1.$$

$$3) \quad \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -6 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u, \lambda_1^s = -1 + 5,9i, \lambda_2^s = -1 - 5,9i.$$

λ_1^s, λ_2^s – собственные значения разомкнутой системы. Во всех примерах заданная скорость сходимости $\sigma = 2$.

На рисунке ниже изображены собственные значения оптимальной по норме обратной связи замкнутой систем для примеров 1, 2, 3.



Рис. 1. Собственные значения для примеров 1, 2, 3: $s1, s2, s3$ – обозначения 1, 2 и 3 систем соответственно, зеленым отмечены собственные числа разомкнутой системы, а фиолетовым – оптимальные собственные значения замкнутой системы

4. Заключение

В данной работе предложено решение задачи модального управления при условии обеспечения заданной степени устойчивости замкнутой системы по критерию минимизации нормы обратной связи. Решение этой задачи декомпозируется на независимо решаемые подзадачи первого порядка. Особенностью предлагаемого подхода является использование ортонормированных преобразований, сохраняющих норму матрицы обратной связи на стадии приведения исходной системы, а также использование комплексных преобразований при назначении спектра системы. Эффективность разработанных алгоритмов оптимизации продемонстрирована на численных примерах.

Литература

1. АНДРЕЕВ Ю.Н. *Управление конечномерными линейными объектами*. – М.: Наука, 1976.
2. БЭЛЛИМАН Р. *Введение в теорию матриц*. – М.: Наука, 1976.
3. ИКРАМОВ Х.Д. *Численное решение матричных уравнений*. – М.: Наука, 1984.
4. КОРОБОВ В.И., ЛУЦЕНКО А.В. *Робастная стабилизация одного класса нелинейных систем* // Автомат. и телемех. – 2014. – № 8. – С. 99–112.
5. КОЧЕТКОВ С.А., УТКИН В.А. *Минимизация нормы матрицы обратной связи в задачах модального управления* // Автомат. и телемех. – 2014. – № 2. – С. 72–105.
6. КУЗОВКОВ Н.Т. *Модальное управление и наблюдающие устройства*. – М.: Наука, 1976.
7. ПОЛЯК Б.Т., ЩЕРБАКОВ П.С. *Робастная устойчивость и управление*. – М.: Наука, 2002.
8. BHATTACHARYYA S.P., FLEMING J.A., KEEL L.H. *Minimum Norm Pole Assignment via Sylvester's Equation* // AMS Contemporary mathematics. – 1985. – Vol. 47. – P. 265–272.
9. *Robust exact Pole Placement via an LMI-based algorithm* / A. BENZAOUIA, M.A. RAMI, S. FAIZ [ET AL.] // IEEE Trans. on Automat. Control. – 2009. – Vol. 54. No. 2. – P. 394–398.

MINIMIZING THE FEEDBACK MATRIX NORM IN MODAL CONTROL PROBLEM

Nikita Bersenev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, postgraduate (nick.e-note@yandex.ru).

Victor Utkin, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, (495)334-93-21).

Abstract: The modal control problem, which consists in assigning the zeros of the roots of a closed system with choice of linear feedback, is widely known thoroughly studied and widely used in control theory and practice. However, the problem of choosing the spectrum of a closed system is still an open topic for research.

In this paper the problem of minimizing the Frobenius norm of the feedback matrix in the modal control problem is posed. The rate of convergence of the system is set. The main difference between the problem considered here and the known classic modal control problem is that the spectrum of a closed system is not specified, but to be chosen in the optimization process.

Keywords: modal control, linear systems, optimal control.

УДК 62.50
ББК 32.817

СИНТЕЗ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ МАЯТНИКА

Краснов Д.В.¹

(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
РАН, Москва)

Рассматривается электромеханический объект управления – перевернутый маятник с учетом редуцированной динамической модели двигателя постоянного тока. Параметрические неопределенности механической системы и внешние возмущения не принадлежат пространству управления. На основе представления системы в канонической форме «вход – выход» с учетом гладких возмущений разработан закон разрывного управления, обеспечивающий различные режимы работы системы инвариантно по отношению к имеющимся неопределенностям и не требующий перенастройки при изменении внешних воздействий. По измерениям только ошибки слежения разработан метод синтеза укороченного наблюдателя для оценивания смешанных переменных (комбинаций переменных состояний, внешних воздействий и их производных) с линейными корректирующими воздействиями с насыщением.

Ключевые слова: электромеханическая система, слежение, разрывное управление, наблюдатель состояния, робастность.

1. Введение

Рассматривается проблема управления угловым положением перевернутого маятника в условиях параметрической неопределенности и действия внешних возмущений. В модели объекта управления, которая представлена в разделе 2, учитывается динамика электрического исполнительного устройства – элект-

¹ Дмитрий Валентинович Краснов, инженер-программист (dim93kr@mail.ru).

тропровода постоянного тока. С одной стороны, это дает возможность использовать разрывное управление, но, с другой стороны, не позволяет непосредственно компенсировать возмущения, действующие на механическую подсистему.

Тем не менее, если параметрические и внешние возмущения полагаются гладкими функциями времени, то математическая модель объекта управления представима в каноническом виде в виртуальном пространстве смешанных переменных – комбинаций переменных состояния, внешних воздействий и их производных. В данной виртуальной модели созданные комбинации неизвестных возмущений являются уже согласованными (принадлежат пространству управления), но множитель перед управлением теряет определенность.

В разделе 3 на основе канонической системы, записанной относительно ошибки слежения, разработан базовый закон разрывного управления, обеспечивающий отработку различных допустимых траекторий инвариантно по отношению к имеющимся неопределенностям и не требующий перенастройки при изменении внешних факторов и цели управления.

В предположении, что только ошибка слежения подлежит прямым измерениям, в разделе 4 предложен метод синтеза укороченного наблюдателя с линейными корректирующими воздействиями с насыщением, в котором реализуется метод разделения движений в пространстве ошибок наблюдения. Наблюдатель строится как реплика канонической системы и дает оценки смешанных переменных, которые непосредственно фигурируют в базовом законе управления, что существенно упрощает структуру регулятора. В разделе 5 приведены результаты моделирования разработанных алгоритмов.

2. Описание модели объекта управления

Рассматривается опорный электромеханический объект управления [9] – перевернутый маятник (механическая подсистема), управляемый электроприводом постоянного тока. Математическая модель объекта управления включает учитываемую динамику электропривода и имеет вид

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= a_{21} \sin x_1 - a_{22} x_2 + a_{23} (x_3 + \eta), \\ \dot{x}_3 &= -a_{32} x_2 - a_{33} x_3 + b_3 u, \end{aligned}$$

где x_1 – угловое положение маятника (выходная, регулируемая и измеряемая переменная), рад; x_2 – угловая скорость, рад/с; x_3 – вращающий момент, приложенный к маятнику на оси подвеса, который развивается электроприводом с разрывным управлением u (напряжение якоря), Н·м; $b_3 > 0$, $\forall a_{ij} > 0$, b_3, a_{32}, a_{33} – известные коэффициенты передачи, $a_{21} = g/l$, $a_{22} = \kappa/l$, $a_{23} = 1/(ml^2)$, $g = 9,8$ – ускорение свободного падения, м/с²; m, l – масса и длина маятника соответственно, кг, м; κ – коэффициент вязкого трения, параметры m, l, κ точно не определены, Н·с/м², но известны диапазоны, в которых находятся их значения.

$$(2) \quad 0 < m_1 \leq m \leq m_2, \quad 0 < l_1 \leq l \leq l_2, \quad 0 < \kappa_1 \leq \kappa \leq \kappa_2;$$

$\eta(t)$ – неизвестная функция времени, которая характеризует действие внешних, ограниченных возмущений с ограниченной производной:

$$(3) \quad |\eta(t)| \leq N_0, \quad |\dot{\eta}(t)| \leq N_1, \quad t \geq 0.$$

Области изменения переменных состояния имеют конструктивные ограничения, которые согласованы с мощностью электропривода, т. е. режимы работы, параметры которых удовлетворяют неравенствам:

$$(4) \quad |x_i(t)| \leq X_i, \quad i = \overline{1,3}, \quad t \geq 0,$$

обеспечиваются при

$$(5) \quad |u(t)| \leq U.$$

В неравенствах (2)–(5) границы диапазонов считаются известными константами.

Ставится задача синтеза разрывного управления по обратной связи, обеспечивающего слежение выходной переменной $x_1(t)$ за заданной, допустимой траекторией $g(t)$: $|g(t)| \leq X_1$, $|\dot{g}(t)| \leq X_2$, $t \geq 0$ в предположении, что измеряется только

ошибка слежения: $e_1(t) = x_1(t) - g(t)$. Аналитический вид функций $g(t)$, $\dot{g}(t)$, $\ddot{g}(t)$ не известен.

Нетрудно убедиться в том, что система (1) при $\eta(t) \equiv 0$ управляема и наблюдаема относительно выходной переменной [6, 10]. Наша цель состоит в синтезе многофункциональной робастной системы слежения, не требующей перенастройки в зависимости от изменений внешних воздействий и параметров механической подсистемы m , l , κ в известных пределах. Допускается, например, наличие съемных стержней маятника разной массы и разной длины, удовлетворяющих (2). Для решения поставленной задачи требуется привлечь специальные методы робастного управления и наблюдения.

В следующем разделе представлена процедура синтеза базового закона разрывного управления, обеспечивающего асимптотическую стабилизацию ошибки слежения:

$$(6) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = 0$$

в предположении, что текущие значения всех внутренних и внешних переменных известны.

3. Базовый закон разрывного управления

Для синтеза закона управления по обратной связи, обеспечивающего стабилизацию ошибки слежения, целесообразным является представление математической модели объекта управления в эквивалентной форме «вход–выход» относительно ошибок слежения [1]. Предположение о гладкости внешних воздействий позволяет получить каноническую форму «вход–выход» в виртуальном пространстве смешанных переменных – комбинаций переменных состояния, внешних воздействий и их производных [2, 4]. Для получения этой формы нужно три раза продифференцировать ошибку слежения в силу системы (1) и выполнить невырожденные замены переменных. В итоге система (1) будет представлена в следующем каноническом виде:

$$(7) \quad \dot{e}_1 = e_2, \quad \dot{e}_2 = e_3, \quad \dot{e}_3 = \psi(x, t) + bu,$$

где $e_1 = x_1 - g$, $e_2 = x_2 - \dot{g}$, $e_3 = a_{21} \sin x_1 - a_{22} x_2 + a_{23}(x_3 + \eta) - \ddot{g}$ –

это смешанные переменные нового координатного базиса,

$$(8) \quad |e_i(t)| \leq E_i, i=1,2,3, E_{1,2} = 2X_{1,2};$$

функция $\psi(t)$ имеет вид

$$\psi(t) = a_{21}x_2 \cos x_1 + a_{33}a_{21} \sin x_1 - (a_{23}a_{32} + a_{22}a_{33})x_2 + \\ - (a_{22} + a_{33})e_3 + a_{33}a_{23}\eta + a_{23}\dot{\eta} - (a_{22} + a_{33})\ddot{g} - \ddot{g}$$

и полагается возмущением, которое в силу (2)–(4) ограничено

$$(9) \quad |\psi(t)| \leq F \quad \forall t \geq 0$$

и принадлежит пространству управления. В то же время для обеспечения инвариантности к внешнему возмущению в системе (7) нет возможности использовать методы комбинированного управления, так как множитель перед управлением в системе (7) принял вид $b = a_{23}b_3$ и потерял определенность, в силу (1), (2) известен только его знак и диапазон значений:

$$(10) \quad 0 < \bar{b} \leq b \leq \overline{\bar{b}}.$$

Для обеспечения инвариантности по отношению к внешнему согласованному возмущению в системе (7)–(8) вводится базовый закон разрывного управления вида:

$$(11) \quad u = -M \operatorname{sgn} s, \quad s = c_1e_1 + c_2e_2 + e_3, \quad U \geq M = \operatorname{const} > 0,$$

где s – поверхность переключений, $c_i = \operatorname{const} > 0$ – коэффициенты Гурвицева полинома, а именно для корней $\lambda_{1,2}$ уравнения $\lambda^2 + c_2\lambda + c_1 = 0$ выполняется условие: $\operatorname{Re} \lambda_{1,2} < 0$.

Найдем нижнюю оценку для выбора амплитуды разрывного управления M из достаточного условия $s\dot{s} < 0$ [8]:

$$(12) \quad s\dot{s} = s(c_1e_2 + c_2e_3 + \psi(x,t) - bM \operatorname{sgn} s) \leq \\ \leq |s|(c_1E_2 + c_2E_3 + F - \bar{b}M) < 0 \Rightarrow M > (c_1E_2 + c_2E_3 + F) / \bar{b}.$$

При выбранной на основе неравенств (5), (12) амплитуде за конечное время $t_s > 0$ на поверхности $s = 0$ в пространстве R^3 возникнет скользящий режим. При $t > t_s$ динамический порядок системы (7), (11)–(12) понижается с третьего до второго:

$$(13) \quad s = c_1e_1 + c_2e_2 + e_3 = 0 \Rightarrow e_3 = -c_1e_1 - c_2e_2, \\ \dot{e}_1 = e_2, \quad \dot{e}_2 = -c_1e_1 - c_2e_2.$$

Редуцированная система (13), которой описываются движения в скользящем режиме, устойчива, не зависит от возмущений, а желаемые темпы сходимости ошибки слежения (6) обеспечиваются выбором параметров $c_{1,2} > 0$.

Для информационного обеспечения базового закона управления при измерении только ошибки слежения $e_1(t)$ в следующем разделе представлен метод синтеза укороченного наблюдателя состояний и возмущений, в котором также реализуется метод разделения движений.

4. Синтез наблюдателя смешанных переменных

В отличие от известных подходов, требующих расширения пространства состояний за счет экзогенных динамических моделей внешних воздействий [1, 7], предлагается комплексный подход к задаче наблюдения. Для оценивания смешанных переменных вводится наблюдатель второго порядка, построенный на основе укороченной системы (7) в виде

$$(14) \quad \dot{z}_1 = z_2 + v_1, \quad \dot{z}_2 = v_2,$$

где z – вектор состояний, $z = (z_1, z_2)^T \in R^2$, $v_{1,2}$ – корректирующие воздействия наблюдателя, которые формируются на основе измерений $e_1(t)$ так, чтобы обеспечить стабилизацию системы относительно ошибок наблюдения $\varepsilon_i = e_i - z_i$, $i = 1, 2$:

$$(15) \quad \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_2 - v_1, \quad \dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon_3 - v_2,$$

где $e_3(t)$ полагается ограниченным внешним воздействием (8).

Для упрощения вычислительного аспекта ниже предлагается метод синтеза корректирующих воздействий наблюдателя в виде sat-функций – линейных функций с насыщением [3, 5]. Такой подход обеспечивает решение задачи наблюдения с некоторой, наперед заданной точностью, но, в отличие от линейного наблюдателя с большими коэффициентами [11], не требует расширения пространства состояний для оценивания внешних возмущений. Идея заключается в том, чтобы за конечное время $T > 0$ обеспечить в системе (15) стабилизацию с заданной точностью ошибок наблюдения и их производных. Тогда при $T > 0$

переменные наблюдателя сойдутся в малую окрестность смешанных переменных $z_i(t) \approx e_i(t)$, а из уравнения статики $\dot{\varepsilon}_2 = e_3 - v_2 \approx 0$ будет получена оценка $v_2(t) \approx e_3(t)$.

Лемма. Если в системе (15) с корректирующими воздействиями в виде линейных функций с насыщением

$$(16) \quad v_1 = M_1 \text{sat}(l_1 \varepsilon_1) = \begin{cases} M_1 \text{sgn} \varepsilon_1, & |\varepsilon_1| > 1/l_1, \\ M_1 l_1 \varepsilon_1, & |\varepsilon_1| \leq 1/l_1; \end{cases}$$

$$v_2 = M_2 \text{sat}(l_2 v_1) = \begin{cases} M_2 \text{sgn} v_1, & |v_1| > 1/l_2, \\ M_2 l_2 v_1, & |v_1| \leq 1/l_2 \end{cases}$$

начальные условия и функция $e_3(t)$ ограничены

$$(17) \quad |\varepsilon_i(0)| \leq E_i, \quad i=1,2, \quad |e_3(t)| \leq F_3 = E_3,$$

то тогда для любых, сколь угодно малых δ , $T > 0$ найдутся такие положительные действительные числа M_i^*, l_i^* , что $\forall M_i, l_i : M_i > M_i^*, l_i > l_i^*, i=1,2$ выполняются неравенства

$$(18) \quad |\varepsilon_i(t)| \leq \delta, \quad i=1,2, \quad |e_3(t) - v_2(t)| \leq \delta \quad \forall t \geq T.$$

Доказательство. Разделим отрезок времени $[0; T]$ на 4 отрезка с помощью точек $0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4 = T$. Предполагая, что $\delta \ll \min\{E_1, E_2\}$, амплитуды $M_i > 0$ ($i=1,2$) корректирующих воздействий (16) будем выбирать так, чтобы обеспечить последовательно (сверху вниз) сходимостью корректирующих воздействий в линейные зоны за конечное время:

$$(19) \quad |\varepsilon_i(t)| \leq 1/l_i \quad \forall t > t_1, \quad |v_1(t)| \leq 1/l_2 \quad \forall t > t_3.$$

Параметры $l_i > 0$ ($i=1,2$) выполняют роль больших коэффициентов и выбираются так, чтобы обеспечить (18), а также за время $[t_{2i-1}; t_{2i}]$ выполнение неравенств:

$$(20) \quad |\varepsilon_{i+1}(t) - v_i(t)| = |\alpha_{i+1}(t)| \leq \Delta_{i+1} < \delta \quad \forall t > t_{2i}, \quad i=1,2; \quad \varepsilon_3 := e_3.$$

Решения системы (15)–(16) ограничены на любом конечном интервале времени. Параметры корректирующих воздействий выбираются с целью стабилизации переменных состояния, что позволяет ввести ограничения $|\varepsilon_i(t)| \leq F_i = \text{const} \quad \forall t \geq 0, \quad i=1,2.$

В системе (15)–(16) $\operatorname{sgn}v_1(t) = \operatorname{sgn}\varepsilon_1(t) \forall t \geq 0$ по построению, а совпадение знаков $\operatorname{sgn}v_2(t) = \operatorname{sgn}\varepsilon_2(t)$ может не иметь места при $0 \leq t \leq t_2$ и гарантируется только при $\forall t > t_2$ вне окрестности $|\varepsilon_2| \leq \Delta_2$ (20).

Если $\operatorname{sgn}v_2(0) = \operatorname{sgn}\varepsilon_2(0)$, то система (15)–(16) в начальный момент времени представима в виде: $\dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_{i+1} - M_i \operatorname{sgn}\varepsilon_i, i = 1, 2$. Ее переменные монотонно устремятся в некоторые окрестности нуля при выборе амплитуд корректирующих воздействий на основе достаточных условий:

$$(21) \quad \begin{aligned} \varepsilon_i \dot{\varepsilon}_i < 0 &\Rightarrow \varepsilon_i(\varepsilon_{i+1} - M_i \operatorname{sgn}\varepsilon_i) \leq |\varepsilon_i|(F_{i+1} - M_i) < 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow M_i > F_{i+1}, i = 1, 2, \end{aligned}$$

где $F_i = E_i, i = 1, 2$. В худшем случае области изменений ошибок наблюдения можно оценить следующим образом:

$$(22) \quad F_1 = |\varepsilon_1(0)| \leq E_1, F_2 = |\varepsilon_2(t_2)| \leq E_2 + (F_3 + M_2)t_2, F_3 = E_3.$$

Неравенства для выбора амплитуд корректирующих воздействий M_i , обеспечивающих (19) за указанное время, имеют вид

$$(23) \quad M_i > \frac{|\varepsilon_i(t_{2i-2})|}{t_{2i-1} - t_{2i-2}} + F_{i+1}, i = 1, 2.$$

С учетом (22) из (23) последовательно, снизу вверх имеем:

$$(24) \quad M_2 > \frac{E_2 + (F_3 + M_2)t_2}{t_3 - t_2} + F_3 \Rightarrow M_2^* = \frac{E_2 + F_3 t_3}{t_3 - 2t_2},$$

$$2t_2 < t_3 < T, M_1^* = E_1 / t_1 + F_2.$$

Таким образом, найдены M_i^* (24): $\forall M_i > M_i^*, i = 1, 2$, неравенства (19) будут выполнены.

Положим, например, $\Delta t = t_1 = t_2 - t_1 = t_3 - 2t_2 = t_4 - t_3 > 0$. Тогда границы диапазона для выбора $\Delta t > 0$, при котором обеспечивается заданное время $T > 0$ сходимости ошибок наблюдения, имеет вид:

$$(25) \quad T = \Delta t 6 \Rightarrow 0 < \Delta t \leq T / 6.$$

Амплитуды M_i последовательно, снизу вверх выбираются на основе (24), (22) при принятом значении Δt (25).

С учетом (19)–(20) система (15)–(16) представима в виде:

$$(26) \quad \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= -M_1 l_1 \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \quad |\varepsilon_1| \leq 1/l_1 \quad \forall t > t_1; \\ \dot{\varepsilon}_2 &= -M_2 l_2 v_1 + \varepsilon_3 = -M_2 l_2 (\varepsilon_2 - \alpha_2) + \varepsilon_3, \\ |v_1| &\leq 1/l_2 \Rightarrow |\varepsilon_2| \leq 1/l_2 + \Delta_2 \quad \forall t > t_3. \end{aligned}$$

Для переменных системы (26) на интервалах $[t_1; t_1 + \Delta t = t_2]$, $[t_3; t_3 + \Delta t = t_4]$ справедливы оценки соответственно:

$$(27) \quad \begin{aligned} |\varepsilon_1(t_2)| &\leq \frac{|\varepsilon_2(t)|}{M_1 l_1} + \left(\frac{1}{l_1} - \frac{|\varepsilon_2(t)|}{M_1 l_1} \right) e^{-M_1 l_1 \Delta t} \leq \frac{F_2}{M_1 l_1} + \frac{M_1 - F_2}{M_1 l_1} e^{-M_1 l_1 \Delta t}, \\ |\varepsilon_2(t_4)| &\leq \frac{F_3}{M_2 l_2} + \Delta_2 + \frac{M_2 - F_3}{M_2 l_2} e^{-M_2 l_2 \Delta t}. \end{aligned}$$

С учетом $v_1 = M_1 l_1 \varepsilon_1 \quad \forall t > t_1$, $v_2 = M_2 l_2 (\varepsilon_2 - \alpha_2)$, $\forall t > t_3$ из (27) следуют нижние оценки для выбора коэффициентов $l_{1,2} > 0$, при которых обеспечиваются неравенства (20):

$$(28) \quad (M_i - F_{i+1}) e^{-M_i l_i \Delta t} \leq \Delta_{i+1} \Rightarrow l_i > \frac{1}{\Delta t M_i} \ln \frac{M_i - F_{i+1}}{\Delta_{i+1}}, \quad i = 1, 2.$$

С учетом (27)–(28) при $t_{2i} < t \leq T$ для переменных системы (26) имеем соответственно:

$$(29) \quad |\varepsilon_1| \leq \frac{|\varepsilon_2| + \Delta_2}{M_1 l_1}, \quad |\varepsilon_2| \leq \frac{|\varepsilon_3| + \Delta_3}{M_2 l_2} + \Delta_2.$$

Из двух последних выражений (28), (29) следует, что неравенства $|e_3(t) - v_2(t)| \leq \delta$, $|\varepsilon_2(t)| \leq \delta$ будут выполнены $\forall t \geq T$ при любом $l_2 > l_2^*$, если

$$(30) \quad l_2^* = \max \left\{ \frac{F_3 + \delta}{M_2 \delta}; \frac{1}{\Delta t M_2} \ln \frac{M_2 - F_3}{\delta} \right\}.$$

Для выбранного $l_2 > l_2^*$ определяем точность

$$0 < \Delta_2 \leq \delta - (F_3 + \delta)/(M_2 l_2),$$

которую нужно обеспечить выбором l_1 (28). Оба неравенства

$$|\varepsilon_2(t) - v_1(t)| \leq \Delta_2 < \delta \quad \forall t > t_2,$$

$$|\varepsilon_2(t)| \leq \delta \Rightarrow |\varepsilon_1(t)| \leq \frac{\delta + \Delta_2}{M_1 l_1} + \Delta_1 < \delta \quad \forall t \geq T$$

будут выполнены $\forall l_1 > l_1^*$:

$$(31) \quad l_1^* = \max \left\{ \frac{2\delta - (F_3 + \delta) / (M_2 l_2)}{\delta M_1}; \frac{1}{\Delta t M_1} \ln \frac{M_1 - F_2}{\delta - (F_3 + \delta) / (M_2 l_2)} \right\}.$$

Лемма доказана.

Заметим, что оценки (17) справедливы при нулевых начальных условиях $z_i(0) = 0$ в наблюдателе (17). По измерениям $e_1(t)$ можно сразу установить $z_1(0) = e_1(0) \Rightarrow \varepsilon_1(0)$, что несколько ускорит процесс сходимости ошибок наблюдения.

При использовании наблюдателя смешанных переменных (14), (16) базовый закон разрывного управления (11) будет реализован в виде

$$(32) \quad u = -M \operatorname{sgn}(c_1 e_1 + c_2 z_2 + v_2)$$

и в силу (18) за конечное время $t_s > T$ обеспечит попадание изображающей точки в $(c_2 + 1)\delta = \Delta$ – окрестность многообразия $s = 0$, и при $t > t_s$ в замкнутой системе (1), (14), (16), (32) имеет место реальный скользящий режим

$$\dot{e}_1 = e_2, \quad i = \overline{1, n-2}; \quad \dot{e}_2 = -c_1 e_1 - c_2 e_2 + s, \quad |s(t)| \leq \Delta,$$

что обуславливает решение задачи слежения (6) с некоторой точностью $|e_1(t)| \leq \bar{\delta} \quad \forall t > t_s$.

5. Результаты моделирования

Моделирование замкнутой системы (1), (14), (16), (32) проводилось в среде Matlab–Simulink при следующих параметрах:

$$c_1 = c_2 = 4, \quad a_{32} = 2, \quad a_{33} = 10, \quad b_3 = 10, \quad X_1 = 2\pi, \quad X_2 = 1.$$

Рассматривались различные допустимые режимы работы при различных возмущениях с вариациями параметров:

$$m \in [0.9; 1.1], \quad l \in [0.9; 1.1], \quad \kappa \in [7; 9].$$

Для худшего расчетного случая на основе неравенств, полученных при доказательстве леммы, были приняты следующие

коэффициенты корректирующих воздействий (16) и амплитуда разрывного управления (5), (12):

$$(33) \quad l_1 = 50, l_2 = 100, M_1 = 5, M_2 = 10, M = 24.$$

На рис. 1 показан процесс слежения выходной переменной $x_1(t)$ [рад] системы (1) за постоянным сигналом $g(t) = 1,5$ при внешнем возмущении $\eta_1(t) = \sin t$. На рис. 2 показан процесс слежения за переменным сигналом $g = \sin(0,5t)$ при внешнем возмущении $\eta(t) = 0,5 \sin 2t$ при тех же коэффициентах (33).

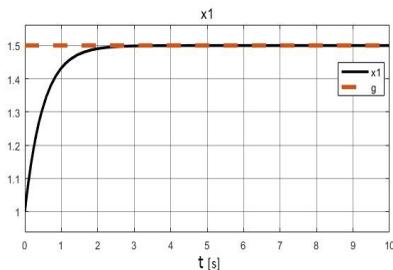


Рис. 1. Слежение выходной переменной $x_1(t)$ за постоянным сигналом $g(t) = 1,5$ рад

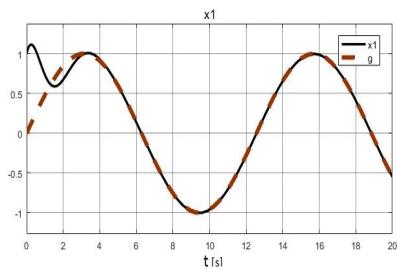


Рис. 2. Слежение выходной переменной $x_1(t)$ за переменным сигналом $g = \sin(0,5t)$ рад

Основная идея работы, позволяющая расширить класс робастных замкнутых систем для динамических объектов, функционирующих в условиях неопределенности, заключается в разработке методов оценивания смешанных переменных с помощью наблюдателя состояния, построенного на основе виртуальной канонической модели. Результаты моделирования подтвердили эффективность разработанного метода синтеза.

Литература

1. АНДРЕЕВ Ю.Н. *Управление конечномерными линейными объектами*. – М.: Наука, 1976. – 424 с.
2. АХОБАДЗЕ А.Г., КРАСНОВА С.А. *Решение задачи слежения в условиях неопределенности на основе совместной блочно-*

- канонической формы управляемости и наблюдаемости // Управление большими системами. – 2009. – Вып. 24. – С. 34–80.
3. КРАСНОВА С.А., УТКИН А.В. *Сигма-функция в задачах синтеза наблюдателей состояний и возмущений* // Проблемы управления. – 2015. – № 5. – С. 27–36.
 4. КРАСНОВА С.А., УТКИН А.В. *Анализ и синтез минимально-фазовых нелинейных SISO-систем при действии внешних несогласованных возмущений* // Проблемы управления. – 2014. – № 6. – С. 22–30.
 5. КРАСНОВ Д.В., РАССАДИН Ю.М., ШИНКАРЮК А.Г. *Реализации метода разделения движений в задачах наблюдения* [Электронный ресурс] // Управление большими системами (УБС'2016): материалы XIII Всерос. shk.-конф. молодых ученых; 5–9 сентября 2016 г., Самара. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2016. – С. 121–133.
 6. МИРОШНИК И.В., НИКИФОРОВ В.А., ФРАДКОВ А.Л. *Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами*. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
 7. НИКИФОРОВ В.О. *Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений*. – СПб.: Наука, 2003. – 282 с.
 8. УТКИН В.И. *Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления*. – М.: Наука, 1981. – 368 с.
 9. ANGELI D. *Almost global stabilization of the inverted pendulum via continuous state feedback* // Automatica. – 2001. – Vol. 37. – P. 1103–1108.
 10. ISIDORI A. *Nonlinear control systems*. 3rd Ed. – Berlin: Springer-Verlag, 1995. – 550 p.
 11. KHALIL H.K., PRALY L. *High-gain observers in nonlinear feedback control* // International Journal Robust and Nonlinear Control. – 2014. – Vol. 24. – P. 993–1015.

SYNTHESIS OF THE ROBUST CONTROL SYSTEM OF THE PENDULUM POSITION

Dmitriy Krasnov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (dim93kr@mail.ru).

Abstract: Electromechanical control plant in the form of an inverted pendulum with allowance for the reduced dynamic model of the DC motor is considered. The parametric uncertainties of the mechanical system and external perturbations do not belong to the control space. Based on the representation of the system in the canonical input-output form with allowance for smooth perturbations, a discontinuous control law is design. This law ensures different modes of operation of the system invariant with respect to the existing uncertainties and it does not require reconfiguration when changing external influences. By measurements only tracking errors, method for the synthesis of a reduced observer for estimating mixed variables (combinations of state variables, external influences and their derivatives) is developed.

Keywords: electromechanical system, tracking, discontinuous control, state observer, robustness.

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕВИСА С МНОГОТОЧЕЧНЫМ НАЧАЛЬНО-КОНЕЧНЫМ УСЛОВИЕМ

Конкина А.С.¹

(Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск)

Эволюция свободной поверхности фильтрующейся жидкости в пласте ограниченной мощности моделируется уравнением Девиса с однородными условиями Дирихле. В статье приводится разрешимость многоточечной начально-конечной задачи для стохастической модели Девиса. Основным результатом – доказательство однозначной разрешимости эволюционной модели с аддитивным белым шумом и многоточечным начально-конечным условием.

Ключевые слова: белый шум, винеровский К-процесс, модель Девиса.

1. Введение

Пусть U и F – банаховы пространства, где операторы $L \in L(U; F)$ (т.е. линеен и непрерывен) и $M \in Cl(U; F)$ (т.е. линеен, замкнут и плотно определен), причем M (L, p) -секториален, $p \in \{0\} \cup N$.

Пусть выполняются условия:

$$(A1) \quad U^0 \oplus U^1 = U \quad (F^0 \oplus F^1 = F),$$

которые имеют место либо в случае сильной (L, p) -секториальности оператора M справа (слева), $p \in \{0\} \cup N$, либо рефлексивности пространства $U(F)$.

$$(A2) \quad L_1^{-1} \in L(F^1; U^1),$$

¹ Александра Сергеевна Конкина, ассистент (alexandra.konkina@yandex.ru).

которое имеет место в случае сильной (L, p) -секториальности оператора M , $p \in \{0\} \cup N$. Ранее было показано, что (A1) вместе с условием (L, p) -секториальности оператора M , $p \in \{0\} \cup N$ дает сильную (L, p) -секториальность оператора M справа (слева), $p \in \{0\} \cup N$, а если к ним добавить условие (A2), то получим сильную (L, p) -секториальность оператора M , $p \in \{0\} \cup N$ [?]. Тогда оператор $G = M_0^{-1}L_0 \in L(U^0)$ нильпотентен степени p , а оператор $S = L_1^{-1}M_1 \in Cl(U^1)$ секториален. (A3) еще одно важное условие на относительный спектр оператора M [1].

Построим относительно спектральные проекторы [1] $P_j \in L(U)$ и $Q_j \in L(F)$, $j = \overline{1, n}$, которые имеют вид

$$(1) P_j = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_j} (\mu L - M)^{-1} L d\mu, Q_j = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_j} L(\mu L - M)^{-1} d\mu, j = \overline{1, n},$$

причем оказывается, что при условии (L, p) -секториальности оператора M и условий (A1), (A2), $P_j P = P P_j = P_j$ и $Q_j Q = Q Q_j = Q_j$, $j = \overline{1, n}$. Значит, в данном случае существует

$$\text{проектор } P_0 = P - \sum_{j=1}^n P_j, P_0 \in L(U).$$

Пусть $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ – ограниченная область с границей $\partial\Omega$ класса C^∞ . В цилиндре $\Omega \times \mathbb{R}_+$ рассмотрим эволюционную модель Девиса:

$$(2) \quad (\lambda - \Delta)u_t = \alpha \Delta u - \beta \Delta^2 u + f,$$

$$(3) \quad u(x, t) = \Delta u(x, t) = 0, (x, t) \in \partial\Omega \times \mathbb{R}_+,$$

где $\lambda \in \mathbb{R}$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}_+$. Уравнение (2) вместе с условиями (3), где свободным членом $f = f(t)$ выступает белый шум, можно привести к стохастическому уравнению соболевского типа:

$$(4) \quad Ldu = M u dt + N dW.$$

Здесь U – банахово пространство, F – вещественное сепарабельное гильбертово пространство, операторы $L \in L(U; F)$ и $M \in Cl(U; F)$, а $W = W(t)$ F – значный винеровский K – процесс.

Возьмем $\tau_0 = 0$ и $\tau_j \in \mathbb{R}_+$, если $\tau_{j-1} < \tau_j$ для $j = \overline{1, n}$. Уравнение (4) можно дополнить многоточечным начально-конечным условием:

$$(5) \quad \lim_{t \rightarrow \tau_0^+} P_0(u(t) - \xi_0) = 0, P_j(u(\tau_j) - \xi_j) = 0, j = \overline{1, n},$$

где P_j – относительно спектральные проекторы [2].

Вектор-функцию $u \in C^1([\tau_0, \tau_n]; U) \cap C([\tau_0, \tau_n]; U)$, удовлетворяющую уравнению (4), назовем его *решением*; решение $u = u(t)$ уравнения (4), удовлетворяющее условию (5), назовем *решением многоточечной начально-конечной задачи* (4), (5).

2. Пространство шумов

Пусть $\Omega \equiv (\Omega, A, P)$ – полное вероятностное пространство, снабжено борелевской σ -алгеброй. Назовем случайной величиной измеримое отображение. Отметим, что все случайные величины, имеющие нормальное распределение (т.е. гауссовы), содержатся в пространстве L_2 .

Рассмотрим два отображения: $f: I \rightarrow L_2$, ставящее в соответствие каждому $t \in I$ случайную величину $\xi \in L_2$, и $g: L_2 \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, ставящее в соответствие каждой паре (ξ, ω) точку $\xi(\omega) \in \mathbb{R}$, где $I \subset \mathbb{R}$ – некоторый промежуток. Стохастический процесс – это отображение $\eta: I \times \Omega \rightarrow L_2$, имеющее вид $\eta = \eta(t, \omega) = g(f(t), \omega)$. Отметим, что стохастический процесс $\eta = \eta(t, \cdot)$, т.е. если зафиксировать $t \in I$, является случайной величиной, а стохастический процесс $\eta = \eta(\cdot, \omega)$, т.е. если зафиксировать $\omega \in \Omega$, будет называться (выборочной) траекторией. Назовем непрерывным стохастический процесс η , если при почти всех (п.в.) $\omega \in \Omega$ траектория $\eta(t, \omega)$ непрерывна на I .

Обозначим символом $\mathbb{P} \equiv \mathbb{P}(I \times \Omega; U)$ пространство стохастических процессов. Пространство непрерывных стохастических процессов, чьи случайные величины принадлежат L_2 , обозначим CL_2 , т.е. $\eta \in CL_2$, если $\eta(t, \cdot) \in L_2$ при всех $t \in I$. Отметим что CL_2 является подпространством \mathbb{P} . Отметим, что прост-

пространство CL_2 содержит, в частности, те стохастические процессы, все траектории которых п.н. непрерывны, а все (независимые) случайные величины – гауссовы. Рассмотрим оператор $K \in L(R)$, спектр которого $\sigma(K)$ положителен, т.е. $\sigma(K) \in R_+$. Это возможно, когда $\sigma(K)$ положительно определен и самосопряжен. Последовательность собственных значений оператора K обозначим через $\{\lambda_k\}$. Пусть спектр $\sigma(K)$ дискретен, конечнократен и сгущается только к точке нуль, тогда $\{\lambda_k\}$ занумеруем по невозрастанию с учетом их кратности. Оператор K называется *ядерным*, если $\text{Tr} K = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k < +\infty$. Отметим, что линейная оболочка множества $\{\phi_k\}$ соответствующих собственных векторов оператора K плотна в U . Рассмотрим *броуновские движения*, иначе говоря, последовательность $\{\xi_k\}$.

Стохастический процесс

$$(6) \quad \beta(t) \equiv \beta(t, \omega) = \sum_{k=0}^{\infty} \xi_k \sin \frac{\pi}{2}(2k+1), t \in \bar{R}_+,$$

обладающий свойствами:

(W1) $\beta(0) = 0$ п.в. на Ω , и траектории п.н. непрерывны на \bar{R}_+ ,

(W2) траектории винеровского K -процесса п.н. ни в одной точке недифференцируемы $t \in \bar{R}_+$ и на любом промежутке $I \subset \bar{R}_+$ имеют неограниченную вариацию, называется винеровским K -процессом.

При любых ядерном операторе $K \in L(U)$ и последовательности броуновских движений $\{\xi_k\}$ винеровский K -процесс $W \in CL_2$.

$$(7) \quad W(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \sqrt{\lambda_k} \beta_k(t) \phi_k,$$

Для разрешимости задачи (4), (5) нам понадобится еще одно условие:

$$(A4) \quad QN = N,$$

тогда формальное $u = u(t)$ решение многоточечной начально-конечной задачи для уравнения (4) будет иметь вид

$$(8) \quad u(t) = U_0^t \xi_0 + \sum_{j=1}^m \left[\int_{\tau_j}^t U^{t-s} L_{1j}^{-1} Q_j N dW(s) + U^{t-\tau_j} \xi_j + L_{1j}^{-1} Q_j N W(t) \right].$$

Пусть оператор $M(L, p)$ – секториален и выполнены условия (A1) – (A4). Тогда для любых U^1 -значных гауссовых случайных величин ξ_j , $j = \overline{0, n}$, не зависящих от $W(t)$ и удовлетворяющих условию (7), существует единственное сильное решение задачи (4), (5), которое к тому же имеет вид (18).

3. Модель Девиса

Пусть $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ – ограниченная область с границей $\partial\Omega$ класса C^∞ . Рассмотрим теперь стохастическое эволюционное уравнение

$$(9) \quad (\lambda - \Delta)du = \alpha \Delta u dt - \beta \Delta^2 u dt + NdW$$

с краевыми условиями

$$(10) \quad u(x, t) = \Delta u(x, t) = 0, (x, t) \in \partial\Omega \times \mathbb{R}_+.$$

Пусть $F = L_2(\Omega)$ и $U = \{u \in W_2^2(\Omega) : u(x) = 0, x \in \partial\Omega\}$. Операторы L и M заданы формулами:

$$L = \lambda - \Delta \text{ и } M = \alpha \Delta - \beta \Delta^2,$$

$$\text{dom}M = U \cap \{u \in W_2^4(\Omega) : \Delta u(x) = 0, x \in \partial\Omega\}.$$

Очевидно, при всех $\lambda \in \mathbb{R}$ оператор $L \in L(U; F)$, а при всех $\alpha \in \mathbb{R}, \beta \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ оператор $M \in Cl(U; F)$.

При всех $\lambda \in \mathbb{R}, \alpha, \beta \in \mathbb{R}_+$ оператор M сильно $(L, 0)$ -секториален.

Пусть ϕ_k – ортонормированный набор собственных функций однородной задачи Дирихле для оператора Лапласа Δ в области Ω , занумерованный по невозрастанию собственных значений λ_k с учетом их кратности. Поскольку

$$(\mu L - M)u = \sum_{k=1}^{\infty} (\mu \lambda - (\mu + \alpha) \lambda_k + \beta \lambda_k^2) \langle u, \phi_k \rangle \phi_k$$

при любых $u \in \text{dom}M$, $\mu \in \mathbb{C}$, то

$$(11) \quad (\mu L - M)^{-1} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\langle \cdot, \phi_k \rangle}{\beta \lambda_k^2 - \alpha \lambda_k + \mu(\lambda - \lambda_k)} \phi_k$$

Ряд в (8) сходится абсолютно и равномерно на любом компакте в \mathbb{C} , не содержащем точек:

$$(12) \quad \mu_k = \lambda_k \frac{\beta \lambda_k - \alpha}{\lambda_k - \lambda}, k \in \mathbb{N}.$$

Поскольку спектр $\sigma(\Delta)$ отрицателен, дискретен, конечнократен и сгущается только к $-\infty$, то из (12) следует, что L -спектр $\sigma^L(M)$ оператора M вещественен, дискретен, конечнократен и сгущается только к $-\infty$. При рассмотрении задачи ограничимся только значениями параметра λ , лежащими в спектре оператора Δ . Поэтому из множества чисел (12) следует удалить числа μ_k с номерами k , при которых $\lambda = \lambda_k$.

Итак, пусть $\lambda \in \sigma(\Delta)$, тогда получим:

$$\begin{aligned} (\mu L - M)^{-1} &= \sum_{k=1}^{\infty'} \frac{\langle \cdot, \phi_k \rangle \phi_k}{\beta \lambda_k^2 - \alpha \lambda_k + \mu(\lambda - \lambda_k)} + \sum_{\lambda_k = \lambda} \frac{\langle \cdot, \phi_k \rangle \phi_k}{\beta \lambda^2 - \alpha \lambda}, \\ R_{\mu}^L(M) &= \sum_{k=1}^{\infty'} (\mu + \lambda_k \frac{\beta \lambda_k - \alpha}{\lambda - \lambda_k})^{-1} \langle \cdot, \phi_k \rangle \phi_k = L_{\mu}^L(M), \\ (\nu L - M)^{-1} L_{\mu}^L(M) &= \sum_{k=1}^{\infty'} (\mu + \lambda_k \frac{\beta \lambda_k - \alpha}{\lambda - \lambda_k})^{-1} \times \frac{\langle \cdot, \phi_k \rangle \phi_k}{\beta \lambda_k^2 - \alpha \lambda_k + \mu(\lambda - \lambda_k)}, \end{aligned}$$

где штрих у знака суммы означает отсутствие слагаемых с номерами k такими, что $\lambda = \lambda_k$. Отсюда нетрудно получить сильную L -спектральность оператора M . Простоты ради возьмем оператор $N = Q$, тогда условие (7) очевидно выполняется. Обозначим через $\{\mu_k\}$ последовательность собственных значений оператора Лапласа Δ в области Ω с условием (3), занумерованную по невозрастанию с учетом их кратности, а через $\{\phi_k\}$ – последовательность собственных функций. Тогда

$$(13) \quad u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} e^{\nu_k t} \langle \xi, \phi_k \rangle \phi_k + \sum_{j: \nu_j \in \sigma_j^L(M)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sqrt{\lambda_k}}{\lambda - \mu_k} \int_{\tau_j}^t e^{\nu_k(t-s)} d\beta_k(s) \phi_k,$$

где $\nu_k = \frac{(\alpha \mu_k - \beta \mu_k^2)}{(\alpha - \mu_k)}$ – точки L -спектра оператора M , $\{\lambda_k\}$ – собственные значения специальным образом построенного

ядерного оператора K . Штрих у знака суммы означает отсутствие членов таких, что $\lambda = \mu_k$.

Пусть выполнены условия леммы и теоремы, тогда формула (13) дает существенное сильное решение задачи (2) (3), (5).

Литература

1. SVIRIDYUK G.A., FEDOROV V.E. *Linear Sobolev Type Equations and Degenerate Semigroups of Operators*. – Utrecht; Boston; Köln; Tokyo: VSP, 2003.
2. ZAGREBINA S.A. *Multipoint initial-final value problem for the linear model of plane-parallel thermal convection in viscoelastic incompressible fluid* // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software. – 2014. – Vol. 7, iss. 3. – P. 5–22.

STOCHASTIC DAVIS MODEL WITH MULTIPOINT INITIAL-FINAL VALUE

Alexandra Konkina, SUSU, Chelyabinsk, assistant (alexandra.konkina@yandex.ru).

Abstract: The evolution of the free surface of the filtering fluid in a reservoir of limited power is modeled by the Davis equation with homogeneous Dirichlet conditions. The solvability of the multipoint initial-final problem for the stochastic Davis model is given in the article. The main result is the proof of the unique solvability of the evolutionary model with an additive white noise and a multipoint initial-final condition.

Keywords: white noise, Wiener K-process, Davis model

УДК 519.7
ББК 22.18

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЛОЖНОСТИ ЗАКОНОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТНЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ

Епифанов А.С.¹

*(Институт проблем точной механики
и управления РАН, Саратов)*

В статье осуществляются построение и анализ автоматных моделей дискретных динамических систем. Проводится оценка сложности законов функционирования автоматов на основе использования аппарата геометрических образов автоматов и спектра динамических параметров рекуррентного определения последовательностей. Исследованы оценки сложности автоматов в специальных классах. Осуществлены построение автоматных моделей по геометрическим кривым, имеющим прикладную интерпретацию, а также классификация построенных моделей по сложности.

Ключевые слова: дискретная детерминированная динамическая система, математическая модель, автоматное отображение, геометрический образ автомата, оценка сложности.

1. Введение

Среди фундаментальных составляющих математических моделей сложных дискретных динамических систем находятся алгоритмы, реализуемые системой в соответствии с ее целевым предназначением. Для алгоритмически разрешимого класса задач существует бесконечное множество алгоритмов (решающих класс задач), которое может быть упорядочено по сложности.

¹ Антон Сергеевич Епифанов, кандидат физико-математических наук (epifanovas@list.ru). Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №16-08-00697.

Со сложностью алгоритма в общем случае связана реализация алгоритмов в системе, определяющая ряд важнейших показателей: быстродействие, объем памяти, надежность, энергозатраты и т.п. В связи с этим задачи построения новых методов для оценки сложности законов функционирования систем в целом и конкретных процессов функционирования являются актуальными. Число вариантов понятия сложности продолжает увеличиваться [1]: оценки алгоритмов по их принадлежности к NP и P классам, сложность снизу, сверху, сложность в среднем, битовая сложность, мультипликативная сложность, колмогоровская сложность (сложность Колмогорова – Хайтина), алгебраическая сложность, асимптотические оценки сложности и др. [4]. В данной работе предлагается и иллюстрируется применение нового метода оценки сложности алгоритмов функционирования дискретных динамических систем на основе использования предложенного и разработанного В.А. Твердохлебовым [6] спектра динамических параметров рекуррентного определения последовательностей.

По одной из основных гипотез теории алгоритмов (которую в литературе называют тезисом Черча–Тьюринга [5]) в случае, если задача имеет решение (существует алгоритм решения), то существует машина Тьюринга, которая решает эту задачу. По данной гипотезе класс всех алгоритмов равномогущен классу машин Тьюринга. В свою очередь, машина Тьюринга является расширением конечного детерминированного автомата, класс преобразований которого ограничен числом состояний, входных и выходных сигналов. При снятии ограничения на конечность числа состояний автомата (что сделано В.А. Твердохлебовым за счет введения геометрических образов законов функционирования автоматов [6, 7]) машина Тьюринга может быть представлена как автомат с бесконечным числом состояний, считывающий и записывающий информацию с ячеек ленты. В работе А.Н. Колмогорова и В.А. Успенского [3] отмечается: «... построение теории алгоритмов по образцу теории вычислительных машин требует во всяком случае некоторой идеализации понятия "машины". ... Вся идеализация, необходимая для перехода от реальных вычислительных машин к математическим алгорит-

мам, заключается в допущении неограниченного объема "памяти" машины ([3, с. 6])».

Ввиду ограничений на объем статьи отметим только основные идеи, позволяющие представить законы функционирования автомата типа Мили ($A_s = (S, X, Y, \delta, \lambda, s)$ с множествами состояний S , входных сигналов X и выходных сигналов Y , функцией переходов $\delta: S \times X \rightarrow S$, функцией выходов $\lambda: S \times X \rightarrow Y$ и начальным состоянием $s \in S$) в числовой форме (в форме геометрического образа γ_s):

1. Линейно упорядочивается автоматное отображение: $\rho'_s = \bigcup_{p \in X^*} \{(p, \lambda'(s, p))\}$, где $\lambda'(s, p) = \lambda(\delta(s, p'), x)$, $p = p'x$.

2. Элементы пар (p, y) автоматного отображения заменяются их номерами $(r_1(p), r_2(y))$ по вводимым линейным порядкам.

3. Полученное множества пар чисел размещается в главном квадранте прямоугольной декартовой системы координат на плоскости.

В работе [6] показано, что при выбранных и зафиксированных в линейном порядке на множестве X^* и величине $m = |X|$ геометрический образ автомата однозначно определяется последовательностью вторых координат его точек.

2. Спектр динамических параметров рекуррентного определения последовательностей

Для строгого представления свойств последовательности В.А. Твердохлебовым введен спектр динамических параметров рекуррентного определения последовательности [6], характеризующий последовательность по взаимосвязям (взаиморасположению) элементов в ней. Рассмотрим спектр для произвольных последовательностей.

Пусть $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ – конечное множество и ξ последовательность элементов из множества U : $\xi = \langle u(1), u(2), \dots, u(t), \dots \rangle$.

Спектр $\Omega(\xi)$ динамических характеристик последовательности $\xi \in U^*$ имеет иерархическую структуру, состоящую из уровней $\Omega(\xi) = (\Omega_0(\xi), \Omega_1(\xi), \Omega_2(\xi), \Omega_3(\xi), \Omega_4(\xi))$. Каждый конкретный

вариант реализации (представление значениями параметров) любого уровня $\Omega_i(\xi)$ определяет разбиение множества U^* на подмножества по свойствам совпадения характеристик. Подмножества такого разбиения будем рассматривать как классы эквивалентности последовательностей. Введём следующие обозначения. Для любой последовательности $\bar{\xi} \in U^V$, где U^V – множество всех последовательностей длины V элементов из множества U , наименьший порядок рекуррентной формы, определяющей последовательность $\bar{\xi}$, будем обозначать $m_0(\bar{\xi})$. Для любой последовательности $\bar{\xi} \in U^V$ и $m \in N^+$, где $1 \leq m \leq m_0(\bar{\xi})$, наибольшую длину начального отрезка последовательности $\bar{\xi}$, определяемого рекуррентной формой порядка m , будем обозначать $d^m(\bar{\xi})$, число смен рекуррентных форм порядка m , требующихся при определении последовательности $\bar{\xi}$, будем обозначать $r^m(\bar{\xi})$, а длину j -го отрезка в определении последовательности $\bar{\xi}$ будем обозначать $d_j^m(\bar{\xi})$.

Используя введенные обозначения, определим спектр параметров, характеризующих последовательность, как следующую структуру: $-\Omega_0(\bar{\xi}) = \langle m_0(\bar{\xi}) \rangle$; $-\Omega_1(\bar{\xi}) = \langle d^1(\bar{\xi}), d^2(\bar{\xi}), \dots, d^\alpha(\bar{\xi}) \rangle$; $-\Omega_2(\bar{\xi}) = \langle r^1(\bar{\xi}), r^2(\bar{\xi}), \dots, r^\alpha(\bar{\xi}) \rangle$; $-\Omega_3(\bar{\xi}) = \langle \Omega_3^1(\bar{\xi}), \Omega_3^2(\bar{\xi}), \dots, \Omega_3^\alpha(\bar{\xi}) \rangle$, где $\alpha = m_0(\bar{\xi})$ и $\Omega_3^j(\bar{\xi}) = \langle d_1^j(\bar{\xi}), d_2^j(\bar{\xi}), \dots, d_{n_j}^j(\bar{\xi}) \rangle$ (n_j – номер последнего отрезка в определении последовательности $\bar{\xi}$ как последовательности отрезков, определяемых отдельными рекуррентными формами порядка j).

3. Оценка сложности законов функционирования автоматов, заданных последовательностями

Среди различных подходов к оценке сложности процессов, алгоритмов, законов функционирования автоматов и реализаций этих законов для исследования выбран подход, при котором используется геометрическое представление поведения автоматов.

Рекуррентное описание последовательностей дает полную и глубокую характеристику взаиморасположения элементов в последовательности: определяет функциональную зависимость элемента последовательности от непосредственно предшествующей ему подпоследовательности элементов. Проведено исследование, в котором спектр используется как средство для оценки сложности законов функционирования автоматов, для оценки сложности реализаций алгоритмов, для оценки сложности по геометрическим свойствам трасс формулы-1, для оценки сложности последовательностей ДНК различных живых существ, для оценки сложности функций алгебры логики (см. [7]). Ввиду ограничений на объем статьи приводятся только некоторые результаты из указанных выше. Кроме этого, были классифицированы по сложности взаиморасположения цифр в начальных отрезках последовательностей длины до 1 млн знаков, представляющих приближенно иррациональные числа: π , e , φ (так называемое золотое сечение), $\sqrt{2}$, $\sqrt[3]{2}$, $\ln(2)$, $\ln(10)$, $\zeta(3) = \sum_{x=1}^{\infty} \frac{1}{x^3}$, константа Каталана $C = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2}$, константа Эйлера γ (постоянная Эйлера – Маскерони) и др.

Для оценки сложности взаиморасположения цифр в начальных отрезках последовательностей, представляющих приближения иррациональных чисел π , e , φ , $\sqrt{2}$, $\sqrt[3]{2}$, $\ln(2)$, $\ln(10)$, $\zeta(3)$, константа Каталана C , константа Эйлера γ и др., рассмотрим последовательности длины до 1 000 000 знаков (π и e дополнительно построены и проанализированы до 10 млн знаков). Эти структуры сравнены и классифицированы по сложности на основе показателей первых двух уровней спектра, так как числовые структуры, соответствующие третьему и четвертому уровню, имеют практически непредставимую размерность.

Отметим, что каждая оценка сложности законов функционирования инициального автомата распространяется на весь класс изоморфных по выходам автоматов (включающий $l!$ автоматов, где $l = |Y|$). Введем следующие обозначения: $H = \{e, \pi, \varphi, \sqrt{2}, \sqrt[3]{2}, \ln(2), \ln(10), \zeta(3), C, \gamma\}$, H_d – множест-

во начальных отрезков длины d последовательностей, определяющих элементы множества H , а $\alpha_d^m(H_d) = \{A_d^m(e), A_d^m(\pi), A_d^m(\phi), A_d^m(\sqrt{2}), A_d^m(\sqrt[3]{2}), A_d^m(\ln(2)), A_d^m(\ln(10)), A_d^m(\zeta(3)), A_d^m(C), A_d^m(\gamma)\}$, где $A_d^m(\beta)$, $\beta \in H_d$, – дискретный детерминированный автомат с числом входных сигналов m и β является последовательностью вторых координат точек геометрического образа автомата.

Для проведения исследований были разработаны алгоритмы и программы, позволившие построить указанные спектры для рассмотренных величин. Результаты построения двух первых уровней спектров (показатели Ω_1 приведены в явном виде, а показатели Ω_0 могут быть получены после тривиального анализа показателей Ω_1) динамических параметров для указанных последовательностей приведены в табл. 1. В лемме 1 приведены результаты построения показателей спектров для множества $\alpha_d^m(H_d)$ и разбиения по совпадению показателей на классы эквивалентности по сложности.

Лемма 1. Законы функционирования автоматов из $\alpha_d^m(H_d)$, где $d = 1\,000\,000$:

– по сложности, определяемой нулевым уровнем Ω_0 спектра Ω , образуют 2 класса эквивалентности по сложности:

$$\{A_d^m(e), A_d^m(\pi), A_d^m(\phi), A_d^m(\sqrt[3]{2}), A_d^m(\zeta(3))\} \text{ и}$$

$$\{A_d^m(\sqrt{2}), A_d^m(\ln(2)), A_d^m(\ln(10)), A_d^m(C), A_d^m(\gamma)\};$$

– по сложности, определяемой первым уровнем Ω_1 спектра Ω , образуют одноэлементные классы эквивалентности по сложности.

Доказательство см. [7]. В лемме 1 представлены оценки сложности законов функционирования автоматов для случая их определения последовательностями вторых координат точек их геометрических образов длины $d = 1\,000\,000$. Полученные классы сложности не являются инвариантными относительно изменения длины d рассматриваемых последовательностей.

Таблица 1. Характеристики первого уровня Ω_1 спектра Ω для последовательностей из множества H

Порядок рекуррентной формы	π	e	$\sqrt[3]{2}$	φ	$\zeta(3)$
1	4	5	5	3	5
2	23	10	25	14	5
3	64	10	25	63	52
4	136	10	224	90	183
5	556	500	800	989	612
6	1302	500	872	1211	843
7	4608	2738	3673	3551	2854
8	15442	23552	6733	15320	11923
9	33853	29433	62895	24707	73588
10	240489	159939	278219	111204	96694
11	694410	172265	389536	320819	96694
12	857994	947499	988084	942583	846617
13	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000

4. Оценка сложности автоматных моделей управления движением болидов «Формулы-1»

В данном параграфе содержатся результаты анализа сложности 69 трасс, на которых проводились все официальные этапы автомобильной гоночной серии «Формула-1» с 1950 по 2011 г. Анализ свойств гоночных трасс проводится на основе исследования свойств геометрических кривых, представляющих собой масштабированные карты реальных трасс. Анализ трасс состоит в построении кодов трасс (исследованы различные степени приближения – от 40 до 400 точек), которые также интерпретируются как соответствующие последовательности вторых координат точек геометрических образов автоматов. Для элементов множества, состоящего из 69 построенных числовых последовательностей кодов, строятся спектры, и на основе совпадения числовых показателей спектра множество разбивается на классы эквивалентных последовательностей. Кроме того, по каждой из

69 кривых осуществлено построение семейства автоматов (при различном числе входных сигналов автомата и различных способах доопределения функции переходов автоматов).

Построение числовых последовательностей кодов трасс при анализе сложности управления движением по трассе заданного объекта может быть реализовано различными способами и с разной степенью точности и полноты. В общем случае в коде должны быть представлены: геометрические свойства маршрута, физические свойства маршрута (задымленность, туман, тип покрытия, наличие на покрытии трассы веществ, влияющих на сцепление и др.), свойства объекта движения (например, способность набирать/снижать скорость с заданной интенсивностью), свойства органа управления объектом движения, свойства объектов сигнализации и др. В данной работе при проведении анализа свойств трасс рассматриваются только геометрические свойства маршрутов ввиду того, что за 60 лет происходили существенные изменения в техническом регламенте «Формулы-1», оказывающие принципиальное влияние на свойства объекта движения, свойства органа управления и характеристики средств сигнализации (десятки раз вводились и отменялись разные ограничения на мощность двигателя, диаметр и ширину покрышек (и даже на количество колес, яркий пример чего представляли шестиколесные болиды Tugtell P34 [9]), геометрию и размеры задних и передних антикрыльев, использование систем помощи при торможении и ускорении болида и др.). Числовые последовательности кодов, в которых представлены геометрические свойства трасс, могут быть построены различными способами. В данной работе выбран способ, который предполагает выбор базиса стандартных участков движения и их кодирования, разбиение всего маршрута на стандартные участки и построение кода всего маршрута как числовой последовательности кодов стандартных участков. При этом используется существующая гоночная классификация стандартных участков движения (см. [2]), а направление обхода для каждой кривой совпадает с направлением движения болидов «Формулы-1» по трассе, которой сопоставляется кривая. В качестве примера на рис. 1 приведены карты двух трасс: (а) – Brands Hatch (Кент, Великобритания) и (б) –

Ноккенхаймринг (Хокенхайм, Германия) и выбранного разбиения трасс на стандартные участки. Показатели на нулевом уровне спектра: последовательность ξ_1 , кодирующая трассу (a) Brands Hatch, $-\Omega_0(\xi_1) = m_0(\xi_1) = 19$; последовательность ξ_2 , кодирующая трассу (b) Ноккенхаймринг, $-\Omega_0(\xi_2) = m_0(\xi_2) = 21$ (для выбранного варианта кодирования трассы). Значения показателей для ξ_1 и ξ_2 на уровнях $\Omega_1 - \Omega_3$ в явном виде не приводятся ввиду большой размерности.

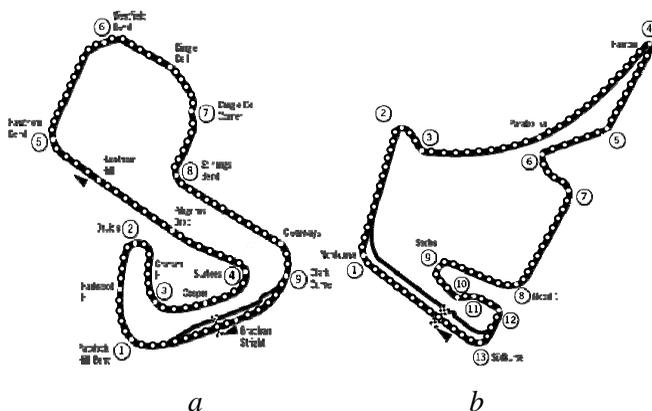


Рис. 1. Карты трасс:
a – Brands Hatch; b – Ноккенхаймринг

Построены числовые последовательности кодов всех 69 трасс и проведен их анализ с использованием спектра динамических параметров Ω . Вычислены значения показателей на четырех уровнях $\Omega_0 - \Omega_3$ спектра Ω и на основе полученных значений построены классы эквивалентных по сложности последовательностей и соответствующих им трасс. В качестве примера в табл. 2 приведена классификация трасс на нулевом уровне Ω_0 спектра Ω этапов «Формулы-1» сезона 2008 г., в которой самой сложной оказалась трасса Маньи-Кур гран-при Франции. Кроме того, по каждой кривой осуществляется построение класса автоматов при различных значениях мощности входного алфавита и различных способах доопределения функции переходов автомата. Автоматы минимизируются и на основе числа состояний в ми-

нимальном автомате, сопоставленном с трассой, также проводится классификация трасс по сложности.

Таблица 2. Классы эквивалентных на нулевом уровне Ω_0 спектра Ω этапов «Формулы-1» сезона 2008 г.

Класс	Этап «Формулы-1»	Трасса
K_1	Гран-при Бахрейна	Сахир
	Гран-при Малайзии	Сепанг
	Гран-при Канады	Автодром им. Ж.Вильнева
	Гран-при Германии	Хоккенхаймринг
	Гран-при Венгрии	Хунгароринг
	Гран-при Турции	Курткой
	Гран-при Бельгии	Спа
	Гран-при Китая	Шанхай Интернешнл
	Гран-при Японии	Сузука Интернешнл
	Гран-при Бразилии	Интерлагос
K_2	Гран-при Австралии	трасса Альберт-Парк
	Гран-при Сан-Марино	Автодром имени Энцо и Дино Феррари
	Гран-при Европы	трасса Нюрбургринг
	Гран-при Испании	Каталунья Монтмелло
	Гран-при Италии	Аутодроме Национале
	Гран-при Великобритании	Сильверстоун
K_3	Гран-при США	Автодром Индианаполис Мотор Спидвей
	Гран-при Франции	Маньи-Кур Невер

В один класс разбиения P_1 (по показателям первого уровня Ω_1 спектра Ω) попали этапы гран-при Канады (трасса Автодром имени Жюль Вильнева) и гран-при Японии (трасса Сузука Интернешнл). В [8] приведены данные о трассах, которые подтверждают, что они имеют близкую сложность. Информация, извлеченная из [8], также подтверждает одинаковую сложность данных трасс (для указанных сильнейших пилотов «Формулы-1» число побед на обоих трассах отличается не более чем на 1, или совпадает).

5. Выводы

Изложены результаты, показывающие возможность практического использования спектра динамических параметров для определения свойств и оценки сложности законов функционирования дискретных детерминированных динамических систем на основе исследования свойств числовых последовательностей, взаимно-однозначно определяющих законы функционирования. Проведен анализ сложности трасс «Формулы-1» (трассы, на которых были проведены все официальные этапы с 1950 г. по 2011 г.). Для проведения анализа трасс проведено кодирование трасс (двумя способами), и для получения конкретных оценок и классификации трасс по сложности использован специальный спектр динамических параметров рекуррентного определения последовательностей.

Литература

1. АБРАМОВ С.А. *Лекции о сложности алгоритмов.* – М.: МЦНМО, 2009. – 252 с.
2. БОГДАНОВ О., ЦЫГАНКОВ Э.С. *Основы мастерства.* Изд-во ДОСААФ СССР, 1986. – 60 с.
3. КОЛМОГОРОВ А.Н., УСПЕНСКИЙ В.А. *К определению алгоритма // Успехи математических наук.* – 1958. – Т. XIII, № 4. – С. 3–28.
4. ЛУПАНОВ О.Б. *Асимптотические оценки сложности управляющих систем.* – М.: Изд-во МГУ, 1984.
5. ПЕНРОУЗ Р. *Новый ум короля.* – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 384 с.
6. ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А. *Геометрические образы законов функционирования автоматов.* – Саратов: Наука, 2008. – 183 с.
7. ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А., ЕПИФАНОВ А.С. *Представление автоматных отображений геометрическими структурами.* – Саратов: Наука, 2013. – 204 с.
8. URL: <http://www.formyla-1.ru> (дата обращения: 05.05.2017).
9. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тургрелл_P34 (дата обращения: 05.05.2017).

METHODS OF COMPLEXITY ESTIMATION OF LOWS OF FUNCTIONING OF AUTOMATA MODELS OF SYSTEMS

Anton Epifanov, Institute of Precision Mechanics and Control Sciences of RAS, Saratov, Cand.Sc. (epifanovas@list.ru).

Abstract: In paper are presented results of development and analysis of automata models of discrete dynamical systems. Are spend complexity estimations of automata functioning lows on the basis of use of geometrical images of automata mappings and special spectrum of recurrent definition of sequences. Are research complexity estimations of automatons in special classes. Also in paper are constructed automata models by geometrical curves having an applied interpretation with subsequent classification of models by complexity.

Keywords: discrete determined dynamic system, mathematical model, automaton, geometrical image of automaton, complexity estimation.

УДК 519.714.2

ББК 32.965.5

ПРИМЕР АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ СТАТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С АПРИОРНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

Гусев С.С.¹

*(Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

Рассматривается алгоритм идентификации статического объекта управления с априорными ограничениями. В статье исследуется работа специального алгоритма идентификации, учитывающего имеющуюся информацию о параметрах объекта управления. Алгоритм требует использования большого объема вычислительных ресурсов. Однако в наше время такие вычислительные мощности доступны большинству пользователей. Приводится пример алгоритма идентификации статического объекта управления с априорными ограничениями.

Ключевые слова: идентификация, ограничения, статический объект, оценки параметров.

1. Введение

Идентификация – это определение неизвестных параметров объектов по экспериментальным измерениям входа и выхода. Для стационарных объектов определение параметров может быть сделано один раз и навсегда [3], так как параметры не меняются. Необходимо только, чтобы число экспериментов, т.е. число строк данных, число уравнений было больше числа неизвестных параметров – больше размерности объекта.

Невозможно представить себе современную науку без широкого применения математического моделирования. Сущность этой методологии состоит в замене исходного объекта математической моделью и дальнейшем изучении модели с помощью реализуемых

¹ Сергей Сергеевич Гусев, соискатель (gs-serg@mail.ru).

на компьютерах вычислительно-логических алгоритмов [4]. Работа не с самим объектом, а с его моделью дает возможность относительно быстро и без существенных затрат исследовать его свойства и поведение в любых мыслимых ситуациях (преимущества теории). В то же время вычислительные (компьютерные, имитационные) эксперименты с моделями объектов позволяют, опираясь на мощь современных вычислительных методов и технических инструментов информатики, подробно и глубоко изучать объекты в достаточной полноте, недоступной чисто теоретическим подходам (преимущества эксперимента).

Наличие моделей и механизмов управления привлекательно как с точки зрения управляющего органа [5] – так как позволяет предсказать поведение управляемых субъектов, так и с точки зрения управляемых субъектов – так как делает предсказуемым поведение управляющего органа. Следовательно, снижение неопределенности за счет использования механизмов управления является одним из существенных свойств любой организации как социального института.

Качество идентификации объекта управления в большей степени определяет и качество управления сложным объектом. Большую роль при этом играет учет априорной информации о структуре и параметрах объекта [2].

В докладе исследуется работа специального алгоритма идентификации, учитывающего определенную информацию о параметрах. Приводится пример алгоритма идентификации статического объекта управления с априорными ограничениями.

2. Постановка задачи

Рассмотрим алгоритм идентификации, учитывающий априорную информацию о параметрах объекта. Будем рассматривать объект вида

$$(1) \quad y = h^T x,$$

где y – скалярный выход объекта, x – вектор-строка входных переменных размерности n , h – вектор-строка неизвестных параметров объекта тоже размерности n . Дополнительно об объекте (1) известно, что параметры h , принадлежат априорно известной области H , т.е.

$$(2) \quad h \in H.$$

$$Xk^T = Y.$$

Произведя умножение левой и правой частей этого равенства слева на X^T , получим систему нормальных уравнений:

$$X^T X k^T = X^T Y,$$

по которой с помощью МНК вычисляются оценки параметров объекта (1).

Из матрицы (3) можно получить C_s^n таких n -мерных блоков, для каждого из которых строится свой вектор оценок параметров объекта (1). Все эти оценки параметров собраны в матрицу B , содержащую C_s^n строк и $2n$ столбцов и имеющую вид

$$(4) \quad B = \left\| \begin{array}{cccccc} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots \\ a_{L1} & a_{L2} & \dots & a_{Ln} & k_{L1} & k_{L2} & \dots & k_{Ln} \end{array} \right\|,$$

где $L = C_s^n$.

В любой i -й строке матрицы B в первых n позициях перечислены номера строк a_{ij} матрицы A , использованные для вычисления n оценок k_{ij} , вычисленных по этим строкам и расположенных в (4) в i -й строке на последних n позициях. Априорное условие (2) учитывается путем вычеркивания из (4) всех строк, в которых оценки k не удовлетворяют условию:

$$k_i \in H,$$

где

$$k_i = \|k_{i1} \quad k_{i2} \quad \dots \quad k_{in}\|, \quad (i = 1, 2, \dots, s).$$

В результате вычеркивания получается матрица:

$$B_0 = \left\| \begin{array}{cccccc} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{Nn} & k_{N1} & k_{N2} & \dots & k_{Nn} \end{array} \right\|, k_i \in H,$$

где $N \leq L$.

Введем вектор частоты w , размерности s , имеющий вид

$$w^T = \parallel w(1) \quad w(2) \quad \dots \quad w(s) \parallel,$$

где $w(j)$ – частота использования номера j -й строки матрицы A в матрице B_0 .

Введем новую матрицу F , отличающуюся от A тем, что в нее добавлен столбец, включающий вектор w :

$$(5) \quad F = \left\| \begin{array}{cccccc} w(1) & 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} & y_1 \\ w(2) & 2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} & y_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w(s) & s & x_{s1} & x_{s2} & \dots & x_{sn} & y_s \end{array} \right\|.$$

Последний шаг алгоритма состоит в следующем. Строки матрицы F сортируются по первому столбцу так, чтобы значения $w(j)$ возрастали снизу вверх. Обозначим полученную таким образом матрицу через F_0 .

Оператор, реализующий описанный алгоритм, обозначим через Ψ . Этот оператор преобразует матрицу исходных данных A в матрицу данных, отсортированную по частоте использования строк, в матрице B_0 , учитывающей априорные условия $k_i \in H$. Это можно записать так:

$$(6) \quad F_0 = \Psi\{A\} \quad k_i \in H.$$

Рассмотрим некоторые свойства оператора Ψ , позволяющие существенно увеличить точность идентификации, но для начала приведем сравнение приведенного алгоритма идентификации статического объекта с алгоритмом идентификации статического объекта работы [1].

В работе [1] алгоритм идентификации статического объекта состоит в следующем. Из матрицы исходных данных (3) выбираются блоки из произвольных n строк (по размерности объекта). Для каждого блока составляется своя система уравнений. Из матрицы (3) можно получить C_s^n таких n -мерных блоков, для каждого из которых строится свой вектор оценок параметров объекта (1). Все эти оценки параметров собраны в матрицу B , содержащую C_s^n строк и $2n$ столбцов.

Отличительной особенностью приведенного выше алгоритма от алгоритма, описанного в работе [1], является наличие дополнительного вектора частоты w , по которому сортируются строки, представляя новую матрицу F , которая отличается от матрицы A тем, что в нее добавлен столбец, включающий вектор частоты w . Строки матрицы F сортируются по первому столбцу так, чтобы значения $w(j)$ возрастали снизу вверх.

4. Пример идентификации статического объекта

4.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для примера рассмотрим статический объект с тремя входами [1]. Структура модели, которая считается известной, задается уравнением

$$(6) \quad y_i^* = ax1_i + bx2_i + cx3_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 9).$$

Исходные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для идентификации трехмерного объекта

No	x_1	x_2	x_3	y
1	1	2	3	11
2	1	1	4	9
3	1	5	3	15
4	2	2	3	14
5	2	6	1	11
6	3	2	2	15
7	1	0	3	6
8	1	3	1	8
9	0	0	7	7

Заранее известно, что оценки параметров a , b и c лежат в пределах

$$(7) \quad 0 < a < 2; \quad -1 < b < 0; \quad 0 < c < 1,4.$$

Необходимо по данным 9 экспериментов получить оценки параметров модели (6), учитывая априорную информацию о неизвестных параметрах a , b и c , содержащуюся в неравенствах (7), и оценить точность полученных оценок.

4.2. МНК ОЦЕНКИ БЕЗ УЧЕТА АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Прежде чем использовать алгоритм, учитывающий априорную информацию, вычислим оценки параметров модели (6) с помощью обычной процедуры метода наименьших квадратов. В результате получим следующие значения оценок параметров по 9 экспериментам:

$$\hat{a} = 0,18 \pm 0,33; \quad \hat{b} = 0,29 \pm 0,41; \quad \hat{c} = 0,78 \pm 0,23.$$

Множественный коэффициент корреляции для такой модели будет $R^2 = 0,83$. Эти результаты используем в дальнейшем для сравнения с методом идентификации, учитывающим априорную информацию.

4.3. ПЕРЕХОД В ПРОСТРАНСТВО ПАРАМЕТРОВ

Поскольку нам задан трехмерный объект, то для получения какой-либо оценки требуется не менее трех экспериментов, т.е. трех строк из табл. 1. Используя все возможные комбинации из 9 по 3, получим 84 оценки, вычисленные по разным сочетаниям трех строк из таблицы исходных данных. На рис. 1 показана схема отбора трехстрочных блоков из блока исходных данных

Для вычисления одного вектора оценок необходимо отобрать не менее трех строк. На рис. 1 выбираются 2, 6 и 8 строк из блока исходных данных.

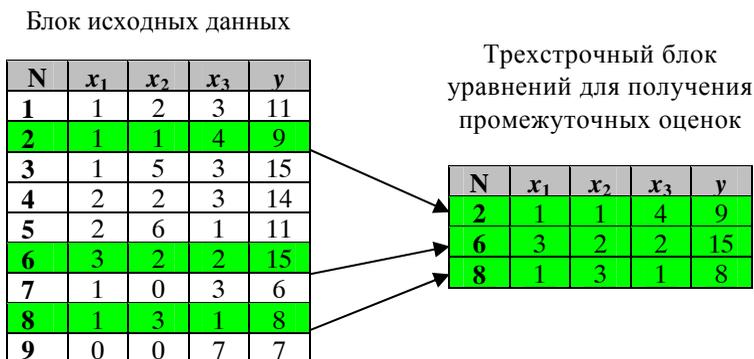


Рис. 1. Схема отбора трехстрочных блоков из блока исходных данных

Все данные о промежуточных оценках сведены в табл. 2. Таблица содержит 84 строки оценок параметров a , b и c и номера строк блока исходных данных, которые были использованы для получения оценок в данной строке. Все полученные 84 оценки сведены в блок промежуточных оценок, показанный в табл. 2.

Таблица 2. Полный блок промежуточных оценок

No	Оценки параметров			Номера выбранных строк			Ind
	a	b	c	$n1$	$n2$	$n3$	
1	10	1,3	2	1	2	3	1
2	4	2,6	0,6	1	2	4	1
3	-18	7	5	1	2	5	1
...	
i	3,5	1,1	1,1	2	6	8	1
...	
84	3	1,3	1	7	8	9	1

Для учета априорных ограничений нужно из табл. 2 удалить строки, в которых содержатся оценки, не удовлетворяющие ограничениям (7). Выполнив это удаление, получим усеченный блок промежуточных оценок, фрагмент которого приведен в табл. 3.

Таблица 3. Усеченный блок промежуточных оценок

No	Оценки параметров			Номера выбранных строк		
	a	b	c	$n1$	$n2$	$n3$
1	0,73	-0,56	1,03	1	2	3
2	0,68	-0,52	1,02	1	2	4
3	0,72	-0,55	1,03	1	2	5
...
i	0,73	-0,57	1,01	2	6	9
...
35	0,72	-0,53	1,03	7	8	9

В табл. 3 содержатся только оценки, удовлетворяющие априорным ограничениям (7). Номера строк исходных данных, по которым вычислялись эти «хорошие» оценки, записаны в трех последних столбцах табл. 3. На рис. 2 приведены

гистограммы частоты использования разных строк блока исходных данных.

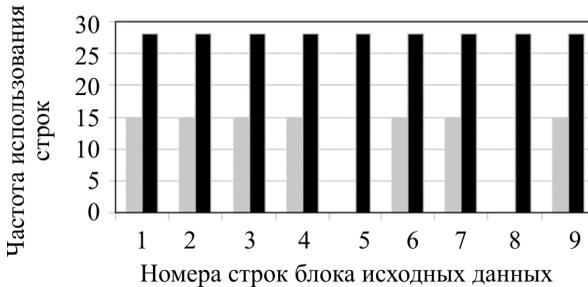


Рис. 2. Гистограммы частоты использования разных строк блока исходных данных; черные прямоугольники в полном блоке промежуточных оценок, серые – в усеченном блоке

Как видно из рис. 2, в полном блоке промежуточных оценок (черные прямоугольники) все строки блока исходных данных используются одинаковое число раз, а именно 28. Совершенно другая картина наблюдается в усеченном блоке промежуточных оценок, хранящем только «хорошие» оценки, удовлетворяющие условиям (7).

Серые прямоугольники, соответствующие усеченному блоку, имеют разную высоту. Строки 1–4, 6, 7 и 9 используются по 15 раз, а строки 5 и 8 не используются совсем. Естественно предположить, что для получения «хороших» оценок, удовлетворяющих априорным условиям, использовались менее зашумленные исходные данные. Если принять эту гипотезу, то следует из блока исходных данных удалить те строки, которые редко используются.

4.4. ВОЗВРАЩЕНИЕ В ПРОСТРАНСТВО ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

После удаления 5-й и 8-й строк блок исходных данных примет вид табл. 4.

Проведем определение параметров модели (18) методом наименьших квадратов, используя данные из усеченной табл. данных 3.

Таблица 4. Блок исходных данных, в котором удалены малоинформативные строки 5 и 8

УСЕЧЕННЫЙ БЛОК ИСХОДНЫХ ДАННЫХ				
No	x_1	x_2	x_3	y
1	1	2	3	11
2	1	1	4	9
3	1	5	3	15
4	2	2	3	14
5	2	6	1	11
6	3	2	2	15
7	1	0	3	6
8	1	3	1	8
9	0	0	7	7

В результате получим следующие значения оценок параметров по 7 экспериментам:

$$\hat{a} = 0,72 \pm 0,0099; \quad \hat{b} = -0,53 \pm 0,0149; \quad \hat{c} = 1,01 \pm 0,0066.$$

Множественный коэффициент корреляции для такой модели будет $R^2 = 0,999910$. Сравнивая эти результаты с идентификацией по 9 экспериментам, видим, что точность оценок резко увеличилась.

В заключение заметим, что истинные значения параметров объекта следующие:

$$a = 0,7; \quad b = -0,5; \quad c = 1.$$

5. Заключение

В работе рассмотрен алгоритм идентификации статического объекта, учитывающий априорную информацию о его параметрах. Алгоритм преобразовывал блок исходных данных в множество блоков меньшей размерности. Для каждого из этих блоков вычислялись оценки параметров объекта и запоминались номера строк, использованных для вычисления этих оценок.

Литература

1. ЧАДЕЕВ В.М., ИЛЮШИН В.Б. *Метод идентификации, учитывающий априорную информацию о параметрах объекта* // Идентификация систем и задачи управления SICPRO '06: тр. V Междунар. конф.; Москва, 30 января–2 февраля 2006 г. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2006. – С. 1091–1105.
2. РАЙБМАН Н.С., ЧАДЕЕВ В.М. *Построение моделей процессов производства*. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.
3. ЧАДЕЕВ В.М., ГУСЕВ С.С. *Идентификация с ограничениями. Определение оценок параметров статического объекта* // Идентификация систем и задачи управления SICPRO '08: тр. VII Междунар. конф.; Москва, 28–31 января 2008 г. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2008. – С. 261–269.
4. САМАРСКИЙ А.А., МИХАЙЛОВ А.П. *Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры*. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 320 с.
5. НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами*. – М.: Изд-во Москов. психолого-социал. ин-та, 2005. – 584 с.

AN EXAMPLE OF THE IDENTIFICATION ALGORITHM OF THE STATIC CONTROL OBJECT WITH A PRIORI CONSTRAINTS

Sergey Gusev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, per-
graduated (gs-serg@mail.ru).

Abstract: The algorithm of identification of a static control object with a priori constraints. This article examines the work of the special identification algorithm that takes into account available information about the parameters of the control object. The algorithm requires the use of a large amount of computational resources. However, in our time, such computational power is available to most users. Is an example of an identification algorithm of the static control object with a priori constraints.

Keywords: identification, restrictions, static object, evaluation parameters.

УДК 517.977
ББК 22.18

О ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

Горелов М.А.¹, Ерешко Ф.И.²

(Вычислительный центр им. А.А. Дородницына
ФИЦ ИУ РАН, Москва)

Анализируются простейшие модели, позволяющие оценить целесообразность процедур децентрализации и централизации управления сложными системами.

Ключевые слова: информационная теория иерархических систем, иерархические игры, максимальный гарантированный результат.

Введение

Данная тема централизации-децентрализации имеет бесконечную историю в обществе, что впечатляюще изложено в обзоре децентрализации [1]. Значительно возросший в настоящее время интерес к проблематике основан на взрывном характере проникновения цифровых технологий см. [2] в сферу государственного и муниципального управления. В работе [3] приведена фраза К. Шваба, «...Дизруптивные изменения, которые несет четвертая промышленная революция, переопределяют деятельность государственных учреждений и организаций... Новые технологии и социальные группировки и взаимодействия, которые ими обеспечиваются, позволяют практически кому угодно оказывать влияние на ситуацию и при этом такими способами, о которых невозможно было бы подумать еще несколько лет назад...».

Одной из таких технологий является технология «блокчейн» (специальная технология ведения распределённых реестров

¹ Михаил Александрович Горелов, кандидат физико-математических наук.

² Феликс Иванович Ерешко, доктор технических наук (fereshko@yandex.ru).

с использованием криптографических алгоритмов). В завершающем абзаце обзора [1], непосредственно посвящённом проблематике использования технологий блокчейна в теории принятия решений, указывается, что децентрализованные приложения и децентрализованные организации на базе блокчейна могут создавать затруднения правительственным организациям в исполнении управляющих и регулирующих функций [1, 4–6].

«Like the internet, blockchain technology is designed to be decentralized, with “layers,” where each layer is defined by an interoperable open protocol on top of which companies, as well as individuals, can build products and services. Bitcoin is the killer app for the blockchain. Bitcoin drives adoption of its underlying blockchain, and its strong technical community and robust code review process make it the most secure and reliable of the various blockchains.

Decentralized applications and decentralized blockchain-based organizations could be more difficult for governments to control and regulate.»

Широко распространённые в различных публикациях утверждения о том, что при использовании технологии блокчейна нет необходимости в централизации, не корректны, поскольку всегда наличествует первый шаг в организации коалиции, когда формируется тот самый алгоритм координирующего управления, который действует автоматически. Стратегия блокчейна автоматизирована, а не является полностью автоматической.

Ещё добавим, что важной особенностью, на которую ссылаются многие авторы работ по технологии блокчейна, является то, что технология направлена на исключение посредников [5].

Введение формализации и алгоритмизации при формировании и реализации договорённостей между участниками коалиции позволяет внести элементы автоматизации в этот процесс. Алгоритмическое исполнение договорённостей участников, использующих в сообществе технологию блокчейна, получило название «умный» контракт.

На более высоком уровне организации жизнедеятельности общества можно говорить о подобном использовании цифровых технологий в законодательстве. Примеры «умных» законов приводятся в [3].

Могут быть два крайних случая: централизация и децентрализация, что касается организации и полной, и неполной информированности относительно параметров и стратегий участников как правил принятия решений в зависимости от имеющейся в наличии информации.

В настоящей работе внимание будет уделено двум интерпретациям, имеющим отношение к информационной теории иерархических систем [8].

В первой рассматривается изначально создание коалицией с децентрализованным управлением и обращение коалиции к созданию координирующего центра (далее – Центр), что можно сформулировать как движение от децентрализации к централизации.

Во втором случае рассматривается делегирование Центром активным подсистемам полномочий по принятию решений, что можно охарактеризовать как движение от централизации к децентрализации.

Часть 1. От децентрализации к централизации. Координирующий Центр

ИСХОДНАЯ ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Рассматривается группа экономически независимых, самостоятельно действующих агентов. В своей деятельности они используют наборы технологий, потребляют ресурсы и производят продукцию, которую реализуют на внешнем рынке. Кроме собственных запасов ресурсов имеется набор общих ресурсов, не принадлежащих отдельным членам группы, но пригодных для использования агентами, и делёж общих ресурсов представляет интерес для всей группы.

Члены группы принимают решение объединиться и создать коалицию, деятельность которой будет выгодна для всех, и рассматривают различные механизмы организации функционирования коалиции. Создаётся координирующий Центр, который на основе принятого алгоритма осуществляет автоматически регулирующие функции.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Итак, пусть имеется n агентов. Будем обозначать их числами от 1 до n . Каждый агент может производить m видов продукции, затрачивая при этом некоторые ресурсы. Число ресурсов будем обозначать буквой k . На производство единицы продукта вида j агент i затрачивает ресурс вида l в количестве p_{lj}^i . Агент i имеет собственный запас ресурса вида l в количестве b_l^i ($l=1, 2, \dots, k$). Кроме того, имеются общие запасы ресурсов в количестве r_l ($l=1, 2, \dots, k$). Продукция вида j может быть реализована на рынке по цене c_j . Таким образом, если агент i произведет продукции вида j в количестве x_j^i ($j=1, 2, \dots, m$), то он потратит ресурс вида l в количестве $p_{11}^i x_1^i + p_{12}^i x_2^i + \dots + p_{1m}^i x_m^i$, а реализовать эту продукцию он сможет за сумму $c_1 x_1^i + c_2 x_2^i + \dots + c_m x_m^i$. По своему смыслу цены c_j положительны, а коэффициенты затрат p_{kj}^i и запасы b_l^i и r_l неотрицательны. Далее будет удобно использовать следующие матричные обозначения. Обозначим через x^i вектор столбец $(x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i)^T$ (верхний индекс T , как обычно, обозначает транспонирование). Пусть $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$, а

$$P^i = \begin{pmatrix} p_{11}^i & p_{12}^i & \dots & p_{1m}^i \\ p_{21}^i & p_{22}^i & \dots & p_{2m}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{k1}^i & p_{k2}^i & \dots & p_{km}^i \end{pmatrix}.$$

Обозначим $b^i = (b_1^i, b_2^i, \dots, b_k^i)^T$, $r = (r_1, r_2, \dots, r_k)^T$. В этих обозначениях предыдущие формулы будут выглядеть следующим образом. Если агент i выпустит продукцию в количестве x^i , то он сможет выручить за нее сумму $c x^i$, и при этом будут затрачены ресурсы в количестве $y^i = P^i x^i$, где y^i – вектор столбец $(y_1^i, y_2^i, \dots, y_k^i)^T$.

ПЕРВАЯ ЗАДАЧА. ИНТЕРВАЛЬНАЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬ.
«ЖЁСТКОЕ» УПРАВЛЕНИЕ

Предположим, что управление системой осуществляется централизованно, т.е. существует некоторый дополнительный орган (Центр), который выбирает объемы общих ресурсов, выделяемых каждому агенту и его программу выпуска продукции. При этом он стремится к максимизации суммарного дохода системы. Будем считать, что характеристики агентов известны Центру неточно. В данной постановке будем предполагать, что Центру не известны точно коэффициенты матриц P^i и векторов b^i . Центр знает лишь, что $p_{ij}^{i-} \leq p_{ij}^i \leq p_{ij}^{i+}$ и $b_l^{i-} \leq b_l^i \leq b_l^{i+}$.

Введя обозначения

$$P^{i-} = \begin{pmatrix} p_{11}^{i-} & p_{12}^{i-} & \dots & p_{1m}^{i-} \\ p_{21}^{i-} & p_{22}^{i-} & \dots & p_{2m}^{i-} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{k1}^{i-} & p_{k2}^{i-} & \dots & p_{kn}^{i-} \end{pmatrix}, \quad P^{i+} = \begin{pmatrix} p_{11}^{i+} & p_{12}^{i+} & \dots & p_{1m}^{i+} \\ p_{21}^{i+} & p_{22}^{i+} & \dots & p_{2m}^{i+} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{k1}^{i+} & p_{k2}^{i+} & \dots & p_{kn}^{i+} \end{pmatrix},$$

$$b^{i-} = (b_1^{i-}, b_2^{i-}, \dots, b_k^{i-})^T, \quad b^{i+} = (b_1^{i+}, b_2^{i+}, \dots, b_k^{i+})^T,$$

эти условия можно символически записать в виде $P^{i-} \leq P^i \leq P^{i+}$ и $b^{i-} \leq b^i \leq b^{i+}$. В описанных условиях будем считать, что Центр должен выбирать управления так, чтобы ресурсов у каждого агента хватило на предложенную ему программу выпуска при любой матрице P^i и любом векторе b^i из указанных диапазонов. Таким образом, перед Центром стоит нестандартная задача оптимизации следующего вида:

$$cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n \rightarrow \max, \quad P^i x^i \leq b^i + y^i, \quad i=1,2,\dots,n,$$

$$y^1 + y^2 + \dots + y^n \leq r,$$

$$x^i \geq 0, \quad y^i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,n.$$

Формально здесь имеется бесконечное число ограничений, поскольку неравенства $P^i x^i \leq b^i + y^i, i=1,2,\dots,n$ должны выполняться для всех $P^{i-} \leq P^i \leq P^{i+}$ и $b^{i-} \leq b^i \leq b^{i+}$. Однако от этой трудности легко избавиться. В самом деле, если выполняются условия $P^{i+} x^i \leq b^{i-} + y^i, i=1,2,\dots,n$, то соответствующие усло-

вия сформулированной выше задачи будут выполнены для любых допустимых матриц P^i и векторов b^i . Следовательно, Центру нужно решить стандартную задачу линейного программирования. Управлениями Центра в этой задаче, разумеется, являются векторы выпусков x^i и векторы выделенных агентам ресурсов y^i ($i=1,2,\dots,n$).

$$cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n \rightarrow \max, \quad P^{i+} x^i \leq b^{i-} + y^i, \quad i=1,2,\dots,n,$$

$$y^1 + y^2 + \dots + y^n \leq r,$$

$$x^i \geq 0, \quad y^i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,n.$$

Согласно теореме Куна–Такера существуют такие неотрицательные числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$, что одна из точек максимума функции

$$cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n - \lambda y^1 - \lambda y^2 - \dots - \lambda y^n$$

при ограничениях

$$P^{i+} x^i \leq b^{i-} + y^i, \quad i=1,2,\dots,n, \quad x^i \geq 0, \quad y^i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,n$$

будет решением интересующей нас задачи линейного программирования (здесь и далее используется обозначение $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$).

Последняя задача максимизации очевидным образом распадается на n независимо решаемых задач линейного программирования:

$$cx^i - \lambda y^i \rightarrow \max, \quad P^{i+} x^i \leq b^{i-} + y^i, \quad x^i \geq 0, \quad y^i \geq 0.$$

(в этой задаче управлениями являются векторы x^i и y^i).

ВТОРАЯ ЗАДАЧА. α – ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬ. «ЖЁСТКОЕ» УПРАВЛЕНИЕ

В этом варианте постановки задачи будем по-прежнему считать, что управления x^i и y^i выбираются централизованно и в условиях неполной информации о параметрах модели. Но неопределенность в данном случае будем задавать несколько иначе. А именно будем считать, что значения коэффициентов матриц P^i и векторов b^i ($i=1, 2, \dots, n$) зависят от некоторого неопределенного фактора α . Про этот фактор лицу, принимающему решение, известно лишь некоторое множество воз-

возможных значений A . Для простоты будем предполагать, что множество A наделено топологией и компактно, а функции $p_{ij}^i(\alpha)$ и $b_i^i(\alpha)$ непрерывны в этой топологии. Таким образом, центр должен решать следующую задачу оптимизации:

$$\begin{aligned} cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n &\rightarrow \max, \\ P^i(\alpha)x^i &\leq b^i(\alpha) + y^i, \quad i=1,2,\dots,n, \quad \alpha \in A, \\ y^1 + y^2 + \dots + y^n &\leq r, \\ x^i &\geq 0, \quad y^i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,n. \end{aligned}$$

В случае, когда множество A бесконечно, в этой задаче вновь имеется бесконечное число ограничений. Но и в данном случае ее можно редуцировать к задаче оптимизации с конечным числом ограничений. Рассмотрим функции:

$$\begin{aligned} f^i(x^i) &= \max_{\alpha \in A} \max_{l=1,2,\dots,k} (p_{l1}^i x_1^i(\alpha) + p_{l2}^i x_2^i(\alpha) + \dots + p_{lm}^i(\alpha)x_m^i - b_l^i(\alpha)), \\ i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

Функции $f^i(x^i)$ являются выпуклыми. Поэтому исходная задача эквивалентна следующей задаче выпуклого программирования:

$$\begin{aligned} cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n &\rightarrow \max, \quad f^i(x^i) \leq y^i, \quad i=1,2,\dots,n, \\ y^1 + y^2 + \dots + y^n &\leq r, \\ x^i &\geq 0, \quad y^i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,n. \end{aligned}$$

Как и в предыдущем случае, теорема Куна–Такера позволяет осуществить декомпозицию этой задачи. А именно существует вектор λ с неотрицательными компонентами, для которого предыдущая задача эквивалентна задаче:

$$\begin{aligned} cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n - \lambda y^1 - \lambda y^2 - \dots - \lambda y^n &\rightarrow \max, \\ f^i(x^i) &\leq y^i, \quad i=1,2,\dots,n, \\ x^i &\geq 0, \quad y^i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,n. \end{aligned}$$

Эта задача, в свою очередь, сводится к решению n задач следующего вида:

$$cx^i - \lambda y^i \rightarrow \max, \quad f^i(x^i) \leq y^i, \quad x^i \geq 0, \quad y^i \geq 0, \quad (i=1,2,\dots,n).$$

Интерпретация этих конструкций такая же, как и в предыдущем случае.

Проблема поиска вектора цен ресурсов λ , разумеется, и в этом случае остается открытой.

Однако описанную процедуру декомпозиции можно использовать для построения итеративного метода «нащупывания» этих цен.

ТРЕТЬЯ ЗАДАЧА. ИНТЕРВАЛЬНАЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬ. «МЯГКОЕ» УПРАВЛЕНИЕ.

В данном варианте будем предполагать, что Центр выбирает распределение ресурсов y^1, y^2, \dots, y^n . Объем выпуска продукции x^i выбирает i -й агент. При этом он преследует собственные цели, которые описываются стремлением к максимизации критерия $c^i x^i$.

Центру известны пределы, в которых могут меняться коэффициенты матриц P^i и векторов b^i ($P^{i-} \leq P^i \leq P^{i+}$ и $b^{i-} \leq b^i \leq b^{i+}$). Множества матриц P^i и векторов b^i , удовлетворяющих условиям $P^{i-} \leq P^i \leq P^{i+}$ и $b^{i-} \leq b^i \leq b^{i+}$, обозначим через Π^i и B^i соответственно. Кроме того, Центр точно знает интересы партнеров (векторы $c^i = (c_1^i, c_2^i, \dots, c_m^i)$).

Каждый из агентов точно знает «свои» матрицу P^i и вектор b^i . Будем предполагать, что Центр обладает правом первого хода, т.е. он первым выбирает свои управления y^1, y^2, \dots, y^n и сообщает о своем выборе партнерам. При этом он рассчитывает на то, что все агенты рациональны, т.е. i -й агент выбирает свои управления x^i из множества $BR^i(y^1, P^i, b^i)$ всех решений задачи

$$c^i x^i \rightarrow \max, P^i x^i \leq b^i + y^i, x^i \geq 0.$$

В этих условиях максимальный гарантированный результат Центра равен

$$\sup_{(y^1, y^2, \dots, y^n) \in Y^1 \times Y^2 \times \dots \times Y^n} \min_{(P^1, P^2, \dots, P^n) \in \Pi^1 \times \Pi^2 \times \dots \times \Pi^n} \min_{(b^1, b^2, \dots, b^n) \in B^1 \times B^2 \times \dots \times B^n} \min_{(x^1, x^2, \dots, x^n) \in BR^1(y^1, P^1, b^1) \times BR^2(y^2, P^2, b^2) \times \dots \times BR^n(y^n, P^n, b^n)} (cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n).$$

Сравним этот результат с результатом Центра в первой задаче.

Пусть $y^1, y^2, \dots, y^n, x^1, x^2, \dots, x^n$ – оптимальное решение первой задачи. Фиксируем произвольное распределение v^1, v^2, \dots, v^n ресурсов, удовлетворяющее ограничению

$$v^1 + v^2 + \dots + v^n \leq r, \quad v^i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Пусть z^i – решение задачи

$$cz^i \rightarrow \max, \quad P^{i+} z^i \leq b^{i-} + v^i, \quad z^i \geq 0.$$

Тогда для любого w^i , удовлетворяющего условиям

$$P^{i+} w^i \leq b^{i-} + v^i, \quad w^i \geq 0,$$

в том числе для $w^i \in BR(v^i, P^{i+}, b^{i-})$, выполняется неравенство $cw^i \leq cz^i$. Суммируя эти неравенства, получим:

$$cw^1 + cw^2 + \dots + cw^n \leq cz^1 + cz^2 + \dots + cz^n.$$

Как было установлено выше, для решения первой задачи выполняются ограничения:

$$P^{i+} x^i \leq b^{i-} + y^i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad y^1 + y^2 + \dots + y^n \leq r,$$

$$x^i \geq 0, \quad y^i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

поэтому $cz^1 + cz^2 + \dots + cz^n \leq cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n$. Следовательно,

$$cw^1 + cw^2 + \dots + cw^n \leq cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n.$$

Тем более,

$$\min_{(w^1, w^2, \dots, w^n) \in BR^1(w^1, P^1, b^1) \times BR^2(w^2, P^2, b^2) \times \dots \times BR^n(w^n, P^n, b^n)} (cw^1 + cw^2 + \dots + cw^n) \leq cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n.$$

и

$$\min_{(P^1, P^2, \dots, P^n) \in \Pi^1 \times \Pi^2 \times \dots \times \Pi^n} \min_{(b^1, b^2, \dots, b^n) \in B^1 \times B^2 \times \dots \times B^n} \min_{(w^1, w^2, \dots, w^n) \in BR^1(w^1, P^1, b^1) \times BR^2(w^2, P^2, b^2) \times \dots \times BR^n(w^n, P^n, b^n)} (cw^1 + cw^2 + \dots + cw^n) \leq cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n.$$

А в силу произвольности распределения v^1, v^2, \dots, v^n получим

$$\sup_{(v^1, v^2, \dots, v^n) \in Y^1 \times Y^2 \times \dots \times Y^n} \min_{(P^1, P^2, \dots, P^n) \in \Pi^1 \times \Pi^2 \times \dots \times \Pi^n} \min_{(b^1, b^2, \dots, b^n) \in B^1 \times B^2 \times \dots \times B^n} \min_{(w^1, w^2, \dots, w^n) \in BR^1(w^1, P^1, b^1) \times BR^2(w^2, P^2, b^2) \times \dots \times BR^n(w^n, P^n, b^n)} (cw^1 + cw^2 + \dots + cw^n) \leq cx^1 + cx^2 + \dots + cx^n.$$

Вывод. Таким образом, максимальный гарантированный результат Центра в третьей задаче при «мягком» управлении всегда не превосходит максимального гарантированного результата Центра в первой задаче при «жестком» управлении.

Часть 2. От централизации к децентрализации. Формирование иерархии

ИСХОДНАЯ ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В [8] Ю.Б. Гермейер и Н.Н. Моисеев выдвинули тезис о том, что иерархия возникает там и тогда, где и когда для эффективного управления системой необходимо обрабатывать слишком большой объем информации о внешней среде. В этом случае лицо, принимающее решения (Центр), может делегировать часть своих полномочий по выбору управлений подчиненным.

Разумеется, при этом подчиненные, выбирая управления, могут (и будут) преследовать свои цели. Но при некоторых условиях Центр от такой децентрализации все же может выиграть. В данном докладе сделана попытка продемонстрировать этот эффект на простейшей из нетривиальных моделей.

Рассмотрим задачу управления некоторой системой с целью максимизировать выигрыш $g(w, \alpha)$, где $w \in W$ – управление, а $\alpha \in A$ – неконтролируемый фактор. Будем предполагать, что система «технологически структурирована». Пока это будет означать, что множество W представимо в виде декартова произведения $W = U \times V^1 \times \dots \times V^n$, а множество $A = A^1 \times \dots \times A^n$. Будем считать, что, принимая решение о выборе управления $w = (u, v^1, \dots, v^n)$, Центр может иметь информацию о реализовавшемся значении неопределенного фактора $\alpha = (\alpha^1, \dots, \alpha^n)$, но объем этой информации не должен превышать l бит. Содержание этой информации выбирает Центр.

ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Здесь управления u, v^1, \dots, v^n выбирает Центр, и при этом он осторожен по отношению к имеющейся неопределенности. Такую задачу можно формализовать следующим образом.

Положим $m = 2^l$, $S = \{0,1\}^l$. Обозначим через $\Phi(X,Y)$ семейство всех функций из множества X в множество Y .

В силу сделанного предположения информацию о реализовавшихся значениях α можно кодировать словами $s \in S$. Семантику этих сообщений можно задавать функциями $P \in \Phi(A,S)$. А выбор управления $w \in W$ в зависимости от полученного сообщения $s \in S$ моделируется функцией $w_* \in \Phi(S,W)$. Таким образом, стратегиями Центра являются пары (w_*, P) из множества $\Phi(S,W) \times \Phi(A,S)$.

Если Центр зафиксирует такую стратегию (w_*, P) и реализуется значение неопределенного фактора α , то выигрыш составит $g(w_*(P(\alpha)), \alpha)$. Поэтому в наихудшем случае выбор стратегии (w_*, P) гарантирует Центру получение выигрыша $\inf_{\alpha \in A} g(w_*(P(\alpha)), \alpha)$, а максимальный гарантированный результат будет следующим:

$$R_0 = \sup_{(w_*, P) \in \Phi(S,W) \times \Phi(A,S)} \inf_{\alpha \in A} g(w_*(P(\alpha)), \alpha).$$

Для вычисления величины R_0 может быть использован следующий результат.

Теорема 1. Если множества $U, V^1, \dots, V^n, A^1, \dots, A^n$ наделены топологиями и компактны, а функция g непрерывна по совокупности аргументов, то

$$R_0 = \max_{(w_1, \dots, w_m) \in W^m} \min_{\alpha \in A} \max_{j=1, \dots, m} g(w_j, \alpha).$$

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Теперь предположим, что центр имеет возможность поручить выбор управления v^i некоторому агенту i ($i = 1, \dots, n$). При этом, естественно, у агента i появятся свои интересы. Будем считать, что:

1) интересы агента i описываются стремлением к максимизации функции $h^i(u, v^i, \alpha)$;

2) выбирая свое управление $v^i \in V^i$ агент I точно знает реализовавшееся значение неопределенного фактора α

(в действительности это еще два предположения о «технологической структурированности» рассматриваемой системы).

За собой Центр оставляет право выбора управления $u \in U$. При этом он по-прежнему может использовать l бит информации о неопределенном факторе. Таким образом, стратегией Центра в этом случае будет пара $(u_*, P) \in \Phi(S, U) \times \Phi(A, S)$.

Будем считать, что центр обладает правом первого хода, т.е. он первым выбирает и сообщает агентам свою стратегию (u_*, P) . В таком случае естественно предположить, что агент i выберет свое управление из множества

$$BR^i(u_*, P, \alpha^i) = \left\{ v^i \in V^i : h^i(u_*(P(\alpha^i)), v^i, \alpha^i) = \max_{\omega^i \in V^i} h^i(u_*(P(\alpha^i)), \omega^i, \alpha^i) \right\}.$$

В таком случае Центр гарантированно может рассчитывать на получение результата:

$$\min_{\alpha \in A} \min_{v^1 \in BR^1(u_*, P, \alpha^1)} \dots \min_{v^n \in BR^n(u_*, P, \alpha^n)} g(u, v^1, \dots, v^n, \alpha),$$

а максимальный гарантированный результат R_1 равен

$$\sup_{(u_*, P) \in \Phi(S, U) \times \Phi(A, S)} \min_{\alpha \in A} \min_{v^1 \in BR^1(u_*, P, \alpha^1)} \dots \min_{v^n \in BR^n(u_*, P, \alpha^n)} g(u, v^1, \dots, v^n, \alpha).$$

Используя прием, впервые примененный в [9], можно установить следующий факт.

Теорема 2. Для того чтобы число γ было гарантированным результатом Центра, необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие:

$$\begin{aligned} & \exists (u_1, \dots, u_m) \in U^m \forall \alpha \in A \exists (\lambda^1, \dots, \lambda^n) \in \mathbf{R}^n \exists j \in \{1, \dots, m\}: \\ & \left[\forall i \in \{1, \dots, n\} \exists v_i^0 \in V^i : h^i(u_j, v_i^0, \alpha^i) \geq \lambda^i \right] \& \\ & \& \left[\forall (v^1, \dots, v^n) \in V^1 \times \dots \times V^n (\exists i \in \{1, \dots, n\} : h^i(u_j, v^i, \alpha^i) < \lambda^i) \vee \right. \\ & \left. \vee g(u_j, v^1, \dots, v^n, \alpha) \geq \gamma \right]. \end{aligned}$$

Кванторы общности и существования можно заменить операторами минимума и максимума, придав этому результату более привычный вид. Введем обозначение:

$$\Lambda(u, \alpha, \gamma) = \{ (v^1, \dots, v^n) \in V^1 \times \dots \times V^n : g(u, v^1, \dots, v^n, \alpha) < \gamma \}.$$

Теорема 3. Пусть множества $U, V^1, \dots, V^n, A^1, \dots, A^n$ наделены топологиями и компактны, а функции g, h^1, \dots, h^n непрерывны по совокупности аргументов. Число γ является гарантированным результатом Центра тогда и только тогда, когда либо

$$\max_{(u_1, \dots, u_m) \in U^m} \min_{\alpha \in A} \max_{\lambda^1, \dots, \lambda^n} \max_{j=1, \dots, m} \min \left\{ \min_{i=1, \dots, n} \max_{v_i^0 \in V^i} (h^i(u_j, v_i^0, \alpha^i) - \lambda^i) \right\},$$

$$\left[\inf_{(v^1, \dots, v^n) \in \Lambda(u_j, \alpha, \gamma)} \max_{i=1, \dots, n} (\lambda^i - h(u_j, v^i, \alpha^i)) \right] \geq 0,$$

либо это неравенство обращается в равенство и инфимум в нем не достигается.

Понятно, что если имеется достаточно эффективный способ проверки последнего условия, то вычисление величины R_1 можно осуществить хотя бы методом деления пополам.

СРАВНЕНИЕ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИИ

Децентрализация управления рассматриваемой системой целесообразна, если $R_1 > R_0$. Примеры систем, для которых выполняются неравенства $R_1 > R_0$ и $R_1 < R_0$, строятся без труда. Поэтому сформулированное условие целесообразности децентрализации является нетривиальным.

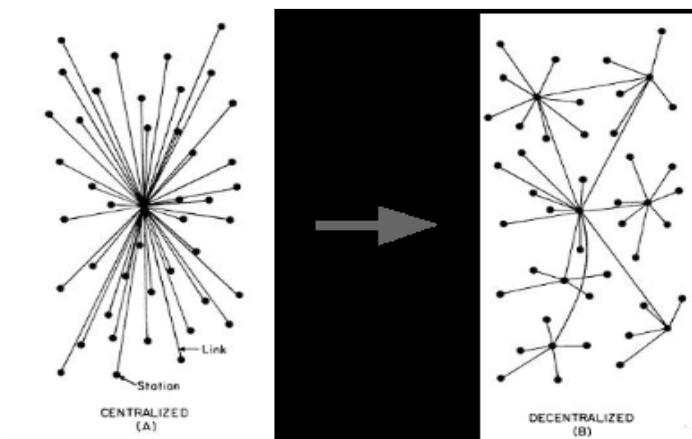
Можно предположить, что с ростом доступного объема информации l величина R_1 «растет быстрее», чем R_0 . Во всяком случае доказывается, что для любой системы и любого $\varepsilon > 0$ при достаточно больших значениях l выполняется неравенство $R_1 > R_0 - \varepsilon$. Таким образом, целесообразность децентрализации действительно связана с ограничением на объем информации.

Вероятно, в данном случае вычисление величины R_1 можно выполнить «традиционным» способом, подобно тому, как была вычислена величина R_0 . Но есть основания утверждать, что использованный выше способ является более универсальным.

В данном случае он предпочтителен еще и потому, что оценить целесообразность децентрализации можно, не вычисляя величины R_1 . Достаточно проверить выполнение условия теоремы 3 для $\gamma = R_0$.

Заключение

Проведенный анализ представляет некие начальные основания для дальнейшего исследования в области централизации-децентрализации.



Кроме того, обратим внимание на факт возможных динамических трансформаций организационных структур, что иллюстрируется на схеме в [5, с. 19]. Electronic copy available at: <http://ssrn.com/abstract=2580664>.

Литература

1. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Decentralization>.
2. ШВАБ К. Четвертая промышленная революция / пер. с англ., предисл. Г.О. Грефа. – М.: Эксмо, 2016. – С. 138.
3. ЕРЕШКО Ф.И. Теория иерархических игр в приложении к законодательству в цифровом обществе // Бизнес в законе. Журнал Computational nanotechnology. – 2017. – № 2. – С. 52–58.
4. Harvard Business Review. *The Blockchain Will Do to the Financial System What the Internet Did to Media*.
5. Aaron Wright* & Primavera De Filippi**. DECENTRALIZED BLOCKCHAIN TECHNOLOGY AND THE RISE OF LEX CRYPTOGRAPHIA // SSRN. – accessed March 21, 2017. – URL: <http://ssrn.com/abstract=2580664>.
6. McGinnis John (7 March 2017). *Bitcoin: Order without Law in the Digital Age*. SSRN 2929133□.
7. ГЕРМЕЙЕР Ю.Б., МОЙСЕЕВ Н.Н. *О некоторых задачах теории иерархических систем* // Проблемы прикладной математики и механики. – М.: Наука, 1971. – С. 30–43.

8. ГОРЕЛОВ М.А. *Максимальный гарантированный результат при ограниченном объеме передаваемой информации* // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 3. – С. 124–144.

ON THE CENTRALIZATION AND DECENTRALIZATION OF CONTROL

Mikhail Gorelov, Dorodnitsyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Cand.Sc.

Feliks Ereshko, Dorodnitsyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Doctor of Science (fereshko@yandex.ru).

Abstract: The simplest models, that make it possible to assess the appropriateness of decentralization and centralization procedures for controlling complex systems, are analyzed.

Keywords: information theory of hierarchical systems, hierarchical games, maximum guaranteed result.

УДК 517.9
ББК 22.1

ОБ ОДНОМ УРАВНЕНИИ СОБОЛЕВСКОГО ТИПА ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Бычков Е.В.¹, Котлованов К.Ю.²
(Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск)

В данной статье рассматривается математическая модель колебаний термоупругой пластины при некоторых допущениях. В ее основе лежит неклассическое уравнение математической физики, кроме того уравнение является уравнением соболевского типа. Как известно задача Коши для уравнения соболевского типа не является разрешимой при произвольных начальных значениях. В статье рассматривается задача Шоуолтера – Сидорова, которая разрешима при произвольных начальных значениях и более «подходящая» для уравнений соболевского типа. Исследуемая математическая модель в подходящем образом выбранных функциональных пространствах может быть редуцирована к абстрактному уравнению соболевского типа третьего порядка с относительно (n, p) -секториальным оператором в правой части. Основным подходом к исследованию является метод построения разрешающих полугрупп.

Ключевые слова: уравнение соболевского типа; относительно спектрально ограниченный оператор; модель колебания термоупругой пластины.

¹ Евгений Викторович Бычков, кандидат физико-математических наук, (bychkov@susu.ru).

² Константин Юрьевич Котлованов, магистр, (kotlovanovki@susu.ru).

Введение

В наше время методы математического моделирования широко применяются в исследованиях динамического поведения пластин. Актуальной задачей в современном строительстве различных зданий, автомобильных дорог, мостов. Вместе с тем, элементы некоторых конструкций, таких как двигатели машин, самолётов, ракет, элементы различных ядерных и атомных станций в процессе эксплуатации подвергаются различным воздействиям температуры. При проектировании такого рода конструкций их динамическое поведение описывается теорией термоупругости. Результаты о доказательстве существования единственного решения являются основой для дальнейшего исследования задач управления.

В дальнейшем для рассмотрения модели колебаний термоупругой пластины, будем рассматривать уравнение вида:

$$(1) u'''_{ttt} + 2\Delta^2 u'_t - \gamma \Delta u'''_{ttt} - k\Delta^3 u + k\gamma \Delta^2 u''_{tt} - k\Delta u''_{tt} = f(x, y, t)$$

Функция u характеризует отклонение пластины от положения покоя. Коэффициенты k и γ – положительные, характеризующие свойства материала термоупругой пластины, $f(x, y, t)$ – это внешнее воздействие. Под термоупругость понимается тепловое расширение полностью обратимо или термически упруго, т.е. эффекты деформации при нагревании и при охлаждении по абсолютной величине равны.

1. Постановка задачи

будем рассматривать уравнение моделирующее колебание термоупругой пластины [5] :

$$(2) u'''_{ttt} + 2\Delta^2 u'_t - \gamma \Delta u'''_{ttt} - k\Delta^3 u + k\gamma \Delta^2 u''_{tt} - k\Delta u''_{tt} = f(x, y, t)$$

Если предположить, что в процессе нагревания пластина не подвержена диффузии или диффузия не значительно влияет на физические свойства и процесс колебания, то параметр k можно положить равным нулю. Таким образом, уравнение (2) упрощается до уравнения вида

$$(3) (\Delta - \lambda)u_{ttt} = \gamma^2 \Delta^2 u_t.$$

Дополним уравнение (3) краевыми условиями Бенера [1]

$$(4) \quad u(x, y, t) = \Delta u(x, y, t) = 0, \quad (x, y, t) \in \partial D \times R,$$

и начальными условиями

$$(5) \quad u^{(m)}(x, y, 0) = u_m(x, y), \quad m = 0, 1, 2.$$

Проинтегрировав уравнение (3) с учетом начальных условий (5), получим

$$(6) \quad (\Delta - \lambda)u_{tt} = \gamma^2 \Delta^2 u + f.$$

$$(7) \quad u(x, y, t) = \Delta u(x, y, t) = 0, \quad (x, y, t) \in \partial D \times R,$$

$$(8) \quad u^{(m)}(x, y, 0) = u_m(x, y), \quad m = 0, 1.$$

Здесь $D \subset \mathbb{R}^2$ – ограниченная область с достаточно гладкой границей ∂D , $f = (\Delta - \lambda)u_2 - \gamma^2 \Delta^2 u_0$.

2. Задача Шоултера – Сидорова для уравнения математической модели колебаний термоупругой пластины

Рассмотрим задачу Коши

$$(9) \quad \lim_{t \rightarrow 0^+} u^{(m)}(t) = u_m, \quad m = 0, 1, \dots, n-1$$

для уравнения

$$(10) \quad Lu^{(n)} = Mu + f.$$

Уравнение (10) редуцируется к системе

$$(11) \quad Hu^{0(n)} = u^0 + M_0^{-1} f^0,$$

для уравнения

$$(12) \quad u^{1(n)} = Su^1 + L_1^{-1} f^0,$$

Рассмотрим задачу Шоултера – Сидорова

$$(13) \quad \lim_{t \rightarrow 0^+} P(\dot{u}(t) - u_1) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow 0^+} P(u(t) - u_0) = 0$$

для уравнения соболевского типа [6]

$$(14) \quad L\ddot{u} = Mu + f,$$

Теорема 1. Для любой вектор-функции f , такой, что $f^0 \in C^2((0, T); \mathfrak{F}^0)$ и $f^1 \in C((0, T); \mathfrak{F}^1)$, и произвольных начальных значениях $u_0, u_1 \in \mathfrak{U}$ существует единственное решение $u \in C^2((0, T); \mathfrak{U})$ задачи (13) для уравнения (14), которое к тому же имеет вид

$$u(t) = \sum_{m=0}^{n-1} U_m^t u_m + \int_0^t U_{n-1}^{t-s} L_1^{-1} f^1(s) ds - \sum_{q=0}^p H^q M_0^{-1} f^{0(nq)}(t)$$

Доказательство. Доказательство основано на подстановке решения в уравнение и начальные условия.

Математическую модель (6)–(8) редуцируем к задаче (9), (10). Для этого введем пространства [2, 4]

$$\mathfrak{U} = \{u \in W_2^{m+2}(D) : u(x, y) = \Delta u(x, y) = 0 \forall (x, y) \in \partial D\},$$

$$\mathfrak{F} = W_2^m(D)$$

и зададим операторы [3]

$$L = \Delta - \lambda \mathbb{I}, \quad M = \gamma^2 \Delta^2.$$

В силу предыдущей теоремы справедлива

Теорема 2. Пусть $f^0 \in C^2((0, T); \mathfrak{F}^0)$ и $f^1 \in C((0, T); \mathfrak{F}^1)$, $\lambda, \gamma \in \mathbb{R}$ ($\gamma \neq 0$). Тогда существует единственное решение задачи (6) – (8).

Литература

1. ЗАМЫШЛЯЕВА А.А. Об аналитическом исследовании математической модели Бенни – Люка // Математические заметки СВФУ. 2013. №2 – С. 57–65.
2. ЗАМЫШЛЯЕВА А.А. Фазовое пространство уравнения соболевского типа высокого порядка // Известия Иркутского государственного университета. 2011. №4 – С. 45–57.
3. СВИРИДЮК Г.А. К общей теории полугрупп операторов // Успехи мат. наук. – 1994. – Т. 49, №. 4. – С. 47–74.
4. СВИРИДЮК Г.А. Фазовые пространства полулинейных уравнений типа Соболева с относительно сильно секториальным оператором // Алгебра и анализ. – 1994. – Т. 6, №. 5. – С. 252–272.
5. ФАЛАЛЕЕВ М.В. Вырожденные дифференциальные уравнения высоких порядков специального вида в банаховых пространствах и их приложения // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2010. – №. 3. – С. 126–139.

6. SVIRIDYUK G.A. Linear Sobolev Type Equations and Degenerate Semigroups of Operator // Utrecht, Boston, Koln: VSP. – 2003.

ON AN EQUATION OF SOBOLEV TYPE OF THIRD ORDER

Evgeny Bychkov, South Ural State University, Chelyabinsk,
Candidate of Physics and Mathematics Sciences,
(bychkovev@susu.ru).

Konstantin Kotlovanov, South Ural State University,
Chelyabinsk, Master of Science, (kotlovanovki@susu.ru).

Abstract: We consider a mathematical model of thermoelastic plate vibrations under certain assumptions. The model is based on the nonclassical high-order equation of the mathematical physics, in addition, the equation is an equation of the Sobolev type. As is known, a Cauchy problem for the equation of Sobolev type is not solvable for arbitrary initial values. In this paper we consider the Showalter-Sidorov problem, which is solvable for arbitrary initial values and is more suitable for a Sobolev type equation. In appropriately chosen functional spaces, the considered mathematical model can be reduced to an abstract Sobolev type equation of the third order with relatively (n, p) -sectorial operator on the right-hand side. The main research approach is the method to construct resolving semigroups.

Keywords: Sobolev type equation; relatively spectral-bounded operator; mathematical model of thermoelastic plate vibrations.

УДК 519.854.2 + 519.852.2
ББК В173

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАГРУЗКИ РЕСУРСОВ ПРИ ПОИСКЕ НИЖНИХ ОЦЕНОК ДЛЯ ЗАДАЧИ RCPSP

Архипов Д.И.¹, Лазарев А.А.²

*(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Москва)*

Тарасов Г.В.³

*(Московский государственный университет им. М.В.
Ломоносова, Москва)*

Рассмотрена задача определения загрузки ресурсов при поиске нижних оценок общего времени выполнения работ проекта с учетом ограничения на ресурсы (RCPSP). Для случая двух ресурсов предложен геометрический подход к решению задачи и представлены два полиномиальных алгоритма точного решения задачи со сложностью $O(n^2)$ и $O(n \log n)$, где n - исходное число работ.

Ключевые слова: задача составления расписания работ проекта с учетом ограничения на ресурсы, нижняя оценка общего времени выполнения проекта, определение загрузки ресурсов.

Введение

Задача построения расписания выполнения работ проекта с учетом ограничений на ресурсы (Resource-constrained project scheduling problem, RCPSP) является одной из основных задач

¹Дмитрий Игоревич Архипов, научный сотрудник, (miptrafter@gmail.com).

²Александр Алексеевич Лазарев, доктор физико-математических наук, профессор (Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, лаб. 68 ИПУ РАН, jobmath@mail.ru).

³Герман Владимирович Тарасов, студент МГУ им. М.В. Ломоносова (gv.tarasov@physics.msu.ru).

теории расписаний [2] и широко применяется в качестве математической модели при управлении циклом производства в масштабных проектах. Задача RCPSP является NP-трудной в сильном смысле [4]. В простейшей формулировке задачи RCPSP проект задается множеством работ и ограничениями доступности ресурсов, требуемых для выполнения работ. Целью является построение расписания с минимальной общей продолжительностью выполнения проекта (makespan).

Большинство точных алгоритмов решения задачи RCPSP основаны на методе ветвей и границ, для применения которого необходимо знание верхних и нижних оценок общей продолжительности проекта. В докладе [3] был представлен алгоритм поиска нижних оценок, основанный на определении загрузки ресурсов. Решение задачи нахождения максимальной загрузки заданной пары ресурсов и стало целью данной работы.

Для решения задачи был использован геометрический подход. Работы представляются в виде векторов на плоскости. Показано, что удовлетворяющие заданным ограничениям линейные комбинации этих векторов образуют на плоскости некоторый выпуклый многоугольник, названный областью разрешимости задачи. Показано, что необходимым и достаточным условием существования оптимального плана выполнения работ является условие принадлежности точки (A, B) этому многоугольнику. Представлены два алгоритма решения задачи, имеющие вычислительные сложности $O(n^2)$ и $O(n \log n)$ операций соответственно, где n - исходное число работ. Данные алгоритмы были использованы при проведении численных экспериментов, результаты которых были представлены в докладе [3].

1. Формулировка задачи

Имеются ресурсы 2 видов в количестве $A, B \in \mathbb{R}^+$ единиц, и множество $N = \{1, \dots, n\}$ работ. На выполнение работы $i \in N$ в полном объеме расходуется a_i, b_i единиц ресурсов. Работы могут выполняться частично: выполняемая часть i -й работы может составлять $0 \leq x_i \leq 1$ от ее полного объема, при этом будет

израсходовано $a_i x_i$, $b_i x_i$ единиц ресурсов соответственно. Требуется определить загрузки ресурсов: составить план выполнения работ, минимизирующий совокупный объем неизрасходованных ресурсов: $((A - \sum_{i=1}^n a_i x_i)^2 + (B - \sum_{i=1}^n b_i x_i)^2)^{1/2} \rightarrow \min$, а загрузки ресурсов A и B (максимальный возможный их расход) равны $\sum_{i=1}^n a_i x_i$ и $\sum_{i=1}^n b_i x_i$ в соответствии с данным оптимальным планом.

2. Сопутствующие задачи

Задача о сумме подмножества. Имеется множество $S = \{s_i\}$ действительных чисел мощностью n . Определить, существует ли для заданного действительного числа s непустое подмножество $S' = \{s_i\}$, $S' \subset S$, $\|S'\| = m \leq n$, имеющее заданную сумму $\sum_{i=1}^m s_i = s$. Эквивалентная постановка: определить, существует ли булев вектор $\vec{x} \mid \forall i \in \overline{1, n} x_i \in \{0, 1\}$ такой, что $\sum_{i=1}^n x_i s_i = s$. Эта задача является NP -трудной и может рассматриваться как частный случай задачи о рюкзаке без повторений ($\{0 - 1\}$ knapsack problem), для которой существует алгоритм с псевдополиномиальной вычислительной сложностью [5].

Задача о сумме подмножества с дроблениями. Имеется множество $S = \{s_i\}$ действительных чисел мощностью n . Определить, существует ли вектор \vec{x} с ограниченными вещественными компонентами $0 \leq x_i \leq 1$ такой, что $\sum_{i=1}^n x_i s_i = s$. Благодаря тому, что компоненты вектора-решения более не являются строго булевыми, данная задача, в отличие от предыдущей, не является NP -трудной: очевидно, пока текущее значение суммы искомой линейной комбинации $\sum_{(i=1)}^k x_i s_i$ и очередного числа s_{k+1} меньше целевого значения s , можно добавлять очередное число полностью ($x_{k+1} = 1$), в противном случае $x_{k+1} = (s - \sum_{i=1}^k x_i * s_i) / s_{k+1}$. Таким образом, задача разрешима за время $O(n)$.

Задача суммирования векторов. Имеется множество n векторов $S = \{s_i\}$ в векторном пространстве размерности k . Вводится метрика $\|\cdot\|$ на данном векторном пространстве (напр., евклидова метрика l_2). Требуется найти булев вектор $X = \{x_i\}$, $x_i \in \{0, 1\}$

такой, что метрика $\|S'\|$ вектора $S' = \sum_{i=1}^n x_i s_i$ достигает максимума. В работе [1] приводятся полиномиальные алгоритмы решения задачи суммирования векторов для случая произвольной размерности для евклидовой и полиэдральной метрик. Однако, в отличие от задачи, рассмотренной в данной работе, исследованная в статье задача не содержит ограничений на значения координат искомой линейной комбинации ("ограничений на ресурсы"), а искомый вектор является строго булевым.

3. Геометрический подход

Сформулируем постановку задачи в виде задачи нелинейного программирования:

Дано: Пара чисел $A, B \in \mathbb{R}^+$, множество векторов на плоскости $S = \{s_i\}$, $s_i = (a_i, b_i)$ с неотрицательными вещественными координатами $a_i, b_i \in \mathbb{R}^+$, $i \in \overline{1, n}$

Найти: Вектор $X = \{x_i\}$ с ограниченными вещественными компонентами $x_i \in [0, 1]$, $i \in \overline{1, n}$ такой, что $A \geq \sum_{i=1}^n a_i x_i$, $B \geq \sum_{i=1}^n b_i x_i$ и $(A - \sum_{i=1}^n a_i x_i)^2 + (B - \sum_{i=1}^n b_i x_i)^2 \rightarrow \min$

3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.

УСЛОВИЕ РАЗРЕШИМОСТИ

Рассмотрим перестановки γ_{up} и γ_{down} из n векторов из множества S , получаемые сортировкой элементов этого множества по убыванию и по невозрастанию соотношения их координат $\frac{b_i}{a_i}$: для последовательности γ_{up}

$$\forall i \in \overline{1, n-1} \quad \frac{b_i^{\gamma_{up}}}{a_i^{\gamma_{up}}} \geq \frac{b_{i+1}^{\gamma_{up}}}{a_{i+1}^{\gamma_{up}}}$$

Для перестановки γ_{down} неравенство обратное. Операция деления здесь несколько "формальная": случай деления на ноль стоит обрабатывать отдельным условным оператором. В случае, когда у каких-либо 2 векторов совпадают соотношения $\frac{b_i}{a_i}$ их координат - порядок следования этих векторов считаем несущественным.

Отложим первый вектор из γ_{up} от начала координат на плоскости, второй - от конца первого и т.д. Получим некоторую ломаную (обозначим ее также γ_{up}) на плоскости. Обозначим как θ_i величину угла между вектором \vec{s}_i и осью абсцисс a , соответственно. Так как сортировки производятся по величине $tg\theta_i$, γ_{up} является выпуклой вверх в каждой своей точке излома. Аналогично получим ломаную γ_{down} , выпуклую вниз в каждой своей точке излома.

Назовем областью разрешимости задачи для множества S плоский многоугольник, образованный ломаными γ_{up} , γ_{down} , отложенными от начала координат на плоскости. Очевидно, этот плоский многоугольник является выпуклым.

Теорема 1. Для любого вектора \vec{x} , компоненты которого x_i удовлетворяют ограничениям $0 \leq x_i \leq 1$ (при этом \vec{x} не обязательно соответствует решению задачи) точка $(\sum_{i=1}^n x_i * a_i, \sum_{i=1}^n x_i * b_i)$, $s_i = (a_i, b_i)$, $s_i \in S$ лежит в пределах (внутри или на границе) области разрешимости множества S .

Доказательство. Построим на плоскости $b(a)$ некоторую ломаную γ из векторов s_i^γ множества S такую, что каждая ее точка лежит не ниже любой другой ломаной ψ , также состоящей из векторов множества S :

$$b^\gamma(a) \geq b^\psi(a)$$

где $b^\gamma(a), b^\psi(a)$ - кусочно-заданные функции - уравнения ломаных γ, ψ на координатной плоскости $b(a)$. Докажем, что ломаная γ совпадает с вышеупомянутой ломаной γ_{up} , то есть является выпуклой вверх в каждой своей точке излома. Предположим обратное: пусть γ не является выпуклой вверх в i -й точке излома, то есть

$$\exists i \in \overline{1, n-1} \frac{b_i^\gamma}{a_i^\gamma} < \frac{b_{i+1}^\gamma}{a_{i+1}^\gamma}$$

Тогда составим ломаную γ' , совпадающую с γ за исключением того, что i и $i+1$ векторы из γ в ней следуют в обратном порядке: $s_i^\gamma = s_{i+1}^{\gamma'}$ $s_{i+1}^\gamma = s_i^{\gamma'}$ При этом γ' является выпуклой вверх

в i -й точке излома, и, очевидно, на отрезке $(\sum_{j=1}^i a_j^\gamma, \sum_{j=1}^{i+1} a_j^\gamma)$ γ' будет лежать выше γ : $b^\gamma(a) < b^{\gamma'}(a)$, что противоречит условию теоремы. Значит, γ совпадает с γ_{up} . Аналогично доказывается, что для произвольной ломаной γ' $b^{\gamma'}(a) \geq b^{\gamma_{down}}(a)$. Очевидно, любая ломаная ψ , полученная из некоторой перестановки векторов $x_i * \vec{s}_i$, $0 \leq x_i \leq 1$, а значит и точка $(\sum_{i=1}^n a_i * x_i, \sum_{i=1}^n b_i * x_i)$ также будет лежать не выше ломаной γ_{up} и не ниже ломаной γ_{down} , то есть в пределах многоугольника, образованного этими ломаными – в пределах области разрешимости. Таким образом, теорема доказана.

Следствие 1. (необходимое и достаточное условие разрешимости задачи): Для того, чтобы задача была разрешима, необходимо и достаточно, чтобы точка (A, B) лежала в пределах области разрешимости множества S .

Таким образом, мы получили способ проверить разрешимость задачи для конкретных входных данных: для этого надо отсортировать векторы из заданного множества S по соотношению их координат $\frac{b_i}{a_i}$, построить на плоскости область разрешимости множества S и проверить, содержит ли она точку (A, B)

4. Поиск решения. Построение алгоритмов.

4.1. АЛГОРИТМ 1

Рассмотрим какое-либо фиксированное множество работ S и вектор ресурсов (A, B) . Пусть соответствующая задача имеет частное решение $\vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Заметим, что если $\exists i \in \overline{1, n} : x_i = 0$ (или 1), то решение \vec{x} такой задачи совпадает с решением \vec{x}' задачи для множества работ $S' = S \setminus s_i$ с вектором ресурсов (A, B) (или $(A - a_i, B - b_i)$, соответственно) с той лишь разницей, что в x' "пропущена" компонента x_i

Таким образом, мы получаем стратегию, в соответствии с которой будем понижать множество имеющихся работ и переходить к задачам с меньшим числом работ, пока оно не станет достаточно малым (0, 1 или 2), чтобы задача свелась к решению простейшей системы линейных алгебраических уравнений.

Алгоритм 1.

1. Отсортировать работы исходного множества работ S по невозрастанию соотношения $\frac{b_i}{a_i}$.

2. Проверить разрешимость задачи для множества S (проверить, принадлежит ли точка (A, B) области разрешимости для множества работ S), если задача неразрешима – конец алгоритма.

3. Положить $i = 1$.

Цикл 1:

1) Для очередной работы $s_i \in S$ построить подмножество работ $S'_i = S \setminus s_i$

2) Проверить, является ли разрешимой задача для множества работ S'_i (см. шаг 2). Если является - в ответ записать $x_i = 0$, положить $S := S'_i$ (с сохранением порядка элементов в множестве) и повторить цикл для следующей работы (перейти к началу шага 3), если таковая имеется.

4. Положить $i = 1$.

Цикл 2:

1) Для каждой работы $s_i \in S$ построить подмножество работ $S'_i = S \setminus s_i$ и модифицированный вектор ресурсов $A' = A - a_i$, $B' = B - b_i$. Примечание: здесь и далее A, B - не исходные количества ресурсов, а их текущие значения, полученные в процессе работы алгоритма.

2) Проверить, является ли разрешимой задача для множества S'_i и пары ресурсов A', B' . Если является - в ответ записать $x_i = 1$, положить $S := S'_i$, $A := A'$, $B := B'$ и повторить цикл для следующей работы, если таковая имеется.

5. Если множество S содержит 2 работы j, k - решить систему уравнений

$$\begin{cases} x_j * a_j + x_k * a_k = A \\ x_j * b_j + x_k * b_k = B \end{cases}$$

(Если S содержит 1 или 0 работ, решение очевидно)

6. Конец работы алгоритма.

Утверждение 1. Алгоритм 1 корректен, т. е. имеет конечное время работы и результатом работы алгоритма является

решение задачи в случае существования такового.

Справедливость этого утверждения доказывается путем простого рассмотрения структуры алгоритма.

Утверждение 2. Алгоритм 1 имеет вычислительную сложность $O(n^2)$ операций, где n – исходное число работ.

Для доказательства достаточно последовательно рассмотреть вычислительную сложность каждого шага алгоритма.

4.2. АЛГОРИТМ 2

Рассмотрим исходное множество работ S . Построим на координатной плоскости ранее описанным способом соответствующий этому множеству работ многоугольник (область разрешимости), обозначим его M . Построим на той же координатной плоскости многоугольник M' , полученный параллельным переносом M на вектор $\overrightarrow{(A, B)}$. Обозначим его M' . Так как M и M' – выпуклые многоугольники и переходят друг в друга при параллельным переносе на вектор $\pm \overrightarrow{(A, B)}$ соответственно, то они могут либо пересекаться не более чем в 2 точках, либо иметь общую грань или ее участок. Рассмотрим одну из точек пересечения (на рис. 1 она обозначена как C).

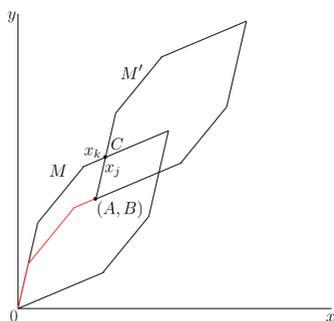


Рис. 1. Пояснение к алгоритму 2

Для определения индексов пересекающихся звеньев j, k

необходимо для всех пар $j, k \in \overline{1, n}$ решить систему

$$(1) \quad \begin{cases} \sum_{i < k} a_i + x_k * a_k = A + \sum_{i < j} a_i + x_j * a_j \\ \sum_{i < k} b_i + x_k * b_k = B + \sum_{i < j} b_i + x_j * b_j \end{cases}$$

относительно x_j, x_k и проверить, удовлетворяет ли полученное решение условию $0 \leq x_j, x_k \leq 1$.

Для координат x_C, y_C точки C и коэффициентов x_k, x_j имеем следующую систему уравнений:

$$(2) \quad \begin{cases} \sum_{i < k} a_i + x_k * a_k = x_C \\ \sum_{i < k} b_i + x_k * b_k = y_C \\ A + \sum_{i < j} a_i + x_j * a_j = x_C \\ B + \sum_{i < j} b_i + x_j * b_j = y_C \end{cases}$$

Заметим, что в силу того, что $A, B > 0$ и $\forall i \in \overline{1, n} a_i, b_i > 0$ имеем $j \leq k$. Исключаем из этой системы x_C, y_C и переносим суммы в левую часть, получаем

$$(3) \quad \begin{cases} \sum_{i < k} a_i + x_k * a_k - \sum_{i < j} a_i - x_j * a_j = A \\ \sum_{i < k} b_i + x_k * b_k - \sum_{i < j} b_i - x_j * b_j = B \end{cases}$$

Преобразуем:

$$(4) \quad \begin{cases} (1 - x_j) * a_j + \sum_{j < i < k} a_i + x_k * a_k = A \\ (1 - x_j) * b_j + \sum_{j < i < k} b_i + x_k * b_k = B \end{cases}$$

Обозначим $\alpha = 1 - x_j, \beta = x_k$ (здесь x_j, x_k - найденное ранее решение системы (2), удовлетворяющее условию $0 \leq x_j, x_k \leq 1$) Таким образом, пересекающиеся звенья j, k многоугольников M', M соответствуют работам j, k , входящим в решение с коэффициентами $0 < \alpha, \beta < 1$.

Тогда можно построить следующий алгоритм:

Алгоритм 2.

1. Отсортировать работы исходного множества работ S по невозрастанию соотношения $\frac{b_i}{a_i}$.

2. Проверить разрешимость задачи для множества S (проверить, принадлежит ли точка (A, B) области разрешимости для множества работ S), если задача неразрешима – конец алгоритма.

3. Положить $j = 1$.

Цикл:

Методом дихотомии определить, существует ли такое $k \in \overline{1, n}$, что решение системы (3) относительно x_j, x_k удовлетворяет условию $0 \leq x_k \leq 1$. Если такого k не существует – повторить цикл для следующей работы $(j + 1)$.

Если такое k существует, но при этом не выполнено условие $0 \leq x_j \leq 1$ – повторить цикл для следующей работы $(j + 1)$.

Если такое k существует, и при этом выполнено условие $0 \leq x_j \leq 1$ – положить $\alpha = 1 - x_j$, $\beta = x_k$, завершить цикл.

4. Положить:

$$\forall i < j : x_i = 0$$

$$x_j = \alpha$$

$$\forall i | j < i < k : x_i = 1$$

$$x_k = \beta$$

$$\forall i > k : x_i = 0$$

5. Конец работы алгоритма.

Утверждение 3. Алгоритм 2 корректен, т. е. имеет конечное время работы и результатом работы алгоритма является решение задачи в случае существования такового.

Справедливость этого утверждения доказывается путем простого рассмотрения структуры алгоритма.

Утверждение 4. Алгоритм 2 имеет вычислительную сложность $O(n \log n)$ операций, где n – исходное число работ.

Для доказательства достаточно последовательно рассмотреть вычислительную сложность каждого шага алгоритма.

Таким образом, алгоритм 1 проигрывает в вычислительной сложности и более того, является достаточно громоздким при реализации, однако он допускает модификации для решения аналогичных задач (напр., если требуется помимо прочего максимизировать число ненулевых компонент в ответе, или если работы

имеют "вес" и требуется помимо прочего максимизировать совокупный вес входящих в решение работ), в то время как алгоритм 2 такой особенностью не обладает.

Заключение

Представленные в данной работе алгоритмы решения учитывают все необходимые условия и ограничения, входящие в постановку задачи. Поскольку данные алгоритмы предоставляют точное решение и обладают полиномиальным временем работы, представляется возможным их использование на практике. Алгоритм 2 был использован в работе [3] в качестве составной части алгоритма решения задачи поиска нижней оценки общего времени выполнения работ проекта с ограниченными ресурсами. Представленный в работе [3] алгоритм поиска нижней оценки имеет вычислительную сложность $O(n^3 r(n + m + r)H \log H)$, где n – количество работ, r – количество ресурсов, H – горизонт планирования, m – количество точек излома у функций емкости ресурсов. Наличие компоненты $O(n^3)$ обусловлено иной составной частью алгоритма, не содержащей алгоритм 2.

В дальнейшем планируется развитие разработанного подхода для случая произвольного числа ресурсов, для задач с дополнительными требованиями к входящим в решение работам (задача с весами, задача с ограничением на число не-булевых компонент решения и т. д.), а также применение разработанных алгоритмов в задаче об инвестициях.

Литература

1. А. Е. БАБУРИН, А. В. ПЯТКИН. *О полиномиальных алгоритмах решения одной задачи суммирования векторов* // Дискретный анализ и исследование операций, сер. 1, 2006, том 13(2) стр. 3–10.
2. А. А. ЛАЗАРЕВ, Е. Р. ГАФАРОВ. *Теория расписаний. Задачи и алгоритмы* // М.: Физический факультет МГУ. 2011.

3. D. ARKHIPOV, O. BATTAIA, J. CEGARRA. *Resource load-based makespan estimation algorithm for resource-constrained project scheduling problem* // in Proceedings of ROADEF 2017 Conference, Metz, France.
4. M. R. GAREY, D. S. JOHNSON. *Complexity results for multiprocessor scheduling under resource constraints* // SIAM Journal on Computing 4(4): pp. 397–411, 1975.
5. D. PISINGER. *A Minimal Algorithm for the 0-1 Knapsack Problem* // Operations Research, Vol. 45, No. 5 (Sep. - Oct., 1997), pp. 758-767.

DETERMINING RESOURCE LOADS FOR ESTIMATING MAKESPAN LOWER BOUNDS FOR RESOURCE-CONSTRAINED PROJECT SCHEDULING PROBLEM

Dmitry Arkhipov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Research Fellow (miptrafter@gmail.com).

Alexander Lazarev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, lab. 68 of ICS RAS, jobmath@mail.ru).

German Tarasov, Lomonosov Moscow State University, student (gv.tarasov@physics.msu.ru).

Abstract: We consider the problem of determining resource loads in search of makespan lower bounds for resource-constrained project scheduling problem (RCPSP). For the case of two resources we propose a geometric approach to solving the problem and present two exact polynomial algorithms with time complexities $O(n^2)$ and $O(n \log n)$, where n is the initial number of jobs.

Keywords: scheduling theory, resource-constrained project scheduling problem, makespan lower bound, determining resource loads.

УДК 517.9
ББК 22.193

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕРВНОГО ИМПУЛЬСА В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕМБРАНЕ¹

Гаврилова О.В.²

(Южно-Уральский государственный университет, Челябинск)

В статье рассматривается численное исследование задачи оптимального управления модели Фитц Хью–Нагумо в прямоугольнике. Система уравнений Фитц Хью–Нагумо моделирует процесс распространения нервного импульса в мембране. Данное уравнение относится к полулинейным уравнениям соболевского типа, которые составляют обширную область неклассических уравнений математической физики. Разработан алгоритм численного решения задачи оптимального управления в прямоугольнике на основе модифицированного метода Галеркина и метода декомпозиции, и приведен результат вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: уравнения соболевского типа, метод декомпозиции, численного моделирование.

Введение

В 1961 году Р. Фитц Хью и Дж. Нагумо независимо друг от друга была предложена модель распространения нервного импульса в мембране [4, 5]. Широкое применение эта модель получила в электрофизиологии сердца и головного мозга, в частности для выявления отмирающих нервных клеток в некоторой области. В данной работе будет рассмотрена вырожденная система уравнений Фитц Хью – Нагумо [1] в прямоугольной области

¹ Автор признателен Н.А. Манаковой за ценное обсуждение содержания статьи.

² Гаврилова Ольга Витальевна, аспирант (gavrilova0812@yandex.ru).

$\Omega = (0, a) \times (0, b) \subset \mathbb{R}^2$:

$$(1) \quad \begin{cases} 0 = \alpha_1 v''_{s_1 s_1} + \alpha_1 v''_{s_2 s_2} + \beta_1 w - \varkappa_1 v + u_1, \\ w'_t = \alpha_2 w''_{s_1 s_1} + \alpha_2 w''_{s_2 s_2} + \beta_2 w - \varkappa_2 v - w^3 + u_2. \end{cases}$$

Здесь $w = w(s_1, s_2, t)$ – функция, описывающая динамику мембранного потенциала, $v = v(s_1, s_2, t)$ – медленная восстанавливающая функция, связанная с ионными токами, $\beta_2 \in \mathbb{R}$, $\alpha, \beta_1, \alpha_1, \alpha_2, \varkappa_1, \varkappa_2 \in \mathbb{R}_+$ – фиксированные параметры, характеризующие: \varkappa_1, β_1 – порог возбуждения и его скорость, α_1 – электропроводность среды, α_2 – реполяризацию среды, вектор-функция $u = (u_1, u_2)$ описывает источник возбуждения. Нулевое решение системы при $\beta_2 < 0$ асимптотически устойчиво, а $\beta_2 > 0$ неустойчиво.

1. Аналитическое исследование математической модели распространения нервного импульса в прямоугольной мембране

В цилиндре $\Omega \times (0, T)$ будем рассматривать систему уравнений (1) в случае, когда $\beta_2 < 0$ и $\beta_1 = \varkappa_2$, с краевым условием

$$(2) \quad v(s_1, s_2, t) = 0, \quad w(s_1, s_2, t) = 0, \quad (s_1, s_2, t) \in \partial\Omega \times \mathbb{R}$$

и условием Шоултера – Сидорова

$$(3) \quad w(s_1, s_2, 0) - w_0(s_1, s_2) = 0, \quad (s_1, s_2) \in \Omega.$$

Рассмотрим пространство

$$\begin{aligned} \mathfrak{X} = \{x = (v, w) \mid v \in L_2(0, T; \overset{\circ}{W}_2^1(\Omega)), \\ w \in L_\infty(0, T; \overset{\circ}{W}_2^1(\Omega)) \cap L_4(0, T; L_4(\Omega))\}. \end{aligned}$$

Определение 1. Вектор-функцию $x \in \mathfrak{X}$ при $T \in \mathbb{R}_+$ назовем слабым обобщенным решением задачи Шоултера – Сидорова

ва (1) – (3), если она удовлетворяет

$$\begin{aligned} & \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b (\alpha_1 \nabla v \cdot \nabla \zeta_1 - \beta_1 w \zeta_1 + \varkappa_1 v \zeta_1) ds_2 = \\ & \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b u_1 \zeta_1 ds_2, \\ & \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b (w_t \zeta_1 + \alpha_2 \nabla w \cdot \nabla \zeta_2 - \beta_2 w \zeta_2 + \varkappa_2 v \zeta_2 + w^3 \zeta_2) ds_2 = \\ & \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b u_2 \zeta_2 ds_2, \\ & \int_0^a ds_1 \int_0^b (w(s_1, s_2, 0) - w_0(s_1, s_2)) \zeta_2 ds_2 = 0, \\ & \forall \zeta = (\zeta_1, \zeta_2) \in L_4(\Omega) \times L_4(\Omega). \end{aligned}$$

Рассмотрим задачу оптимального управления

(4) $J(x, u) \rightarrow \inf$
 решениями задачи (1) – (3) в слабом обобщенном смысле и построим пространство управлений $\mathfrak{U} = \{u = (u_1, u_2) : u_1 \in L_2(0, T; \overset{\circ}{W}^{\frac{1}{2}}(\Omega)), u_2 \in L_{\frac{4}{3}}(0, T; L_{\frac{4}{3}}(\Omega))\}$. Выберем непустое замкнутое выпуклое множество $\mathfrak{U}_{ad} \subset \mathfrak{U}$ и зададим целевой функционал

(5)

$$\begin{aligned} J(x, u) = & \vartheta \left(\int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b (v - v^d)^2 ds_2 + \right. \\ & \left. + \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b |\nabla v - \nabla v^d|^2 ds_2 + \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b (w - w^d)^4 ds_2 \right) + \\ & + (1 - \vartheta) \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b (|\nabla u_1|^2 + u_2^{\frac{4}{3}}) ds_2, \end{aligned}$$

где $v^d = v^d(s_1, s_2, t)$, $w^d = w^d(s_1, s_2, t)$ – состояние системы, которое необходимо достичь с минимальными затратами на управление. Таким образом, оптимальное управление решениями задачи (1) – (3) дает возможность минимизировать потери мембранного потенциала при прохождении порога возбуждения.

Определение 2. Пару $(\hat{x}, \hat{u}) \in \mathfrak{X} \times \mathfrak{U}_{ad}$ назовем решением задачи оптимального управления (1) – (4), если

$$J(\hat{x}, \hat{u}) = \inf_{(x,u)} J(x, u),$$

где пары $(x, u) \in \mathfrak{X} \times \mathfrak{U}_{ad}$ удовлетворяют (1) – (3) в слабом обобщенном смысле.

Теорема 1. [2] Пусть $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \varkappa_1 \in \mathbb{R}_+, \beta_2 \in \mathbb{R}_-,$ тогда при любых $x_0 \in \overset{\circ}{W}_2^1(\Omega), T \in \mathbb{R}_+$ существует решение задачи (1) – (4).

2. Алгоритм численного решения

Используя теоретические результаты, полученные в работах [2, 3], нами был разработан и реализован алгоритм нахождения приближенного решения задачи оптимального управления (1) – (4) на основе модифицированных методов декомпозиции, штрафа, Галеркина и Ритца. Приведем данный алгоритм на модельном примере.

Пример 1. Требуется найти решение задачи (1) – (4) при следующих условиях: $\Omega = (0, \pi) \times (0, \pi), \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 2, \beta_1 = 1, \beta_2 = -1, \varkappa_1 = 1, m_1 = 3, m_2 = 3, T = 1, N = 2, \theta = \frac{1}{2}, \vartheta = \frac{99}{100}, \varepsilon = \frac{1}{100}, w_0(s) = \sin(s_1) \cdot \sin(s_2) + \sin(2s_1) \cdot \sin(2s_2), v^d = t \cdot \sin(s_1) \cdot \sin(s_2) + t^2 \cdot \sin(2s_1) \sin(s_2) + \sin(s_1) \cdot \sin(s_2), w_d = t \cdot \sin(s_1) \cdot \sin(s_2) + t^2 \cdot \sin(2s_1) \sin(s_2) + \sin(s_1) \cdot \sin(s_2).$ •

Запишем систему уравнений (1) при сформулированных условиях:

$$(6) \quad \begin{cases} -v''_{s_1 s_1} - v''_{s_2 s_2} - w + v = u_1, \\ w'_t - 2w''_{s_1 s_1} - 2w''_{s_2 s_2} + w + v + w^3 = u_2. \end{cases}$$

Применяя метод декомпозиции, описанный в работе [3], линеаризуем систему (6), введением функции $y = y(s_1, s_2, t)$ и получим эквивалентную задачу Шоултера – Сидорова – Дирихле для системы уравнений:

$$(7) \quad \begin{cases} -v''_{s_1 s_1} - v''_{s_2 s_2} - w + v = u_1, \\ w'_t - 2w''_{s_1 s_1} - 2w''_{s_2 s_2} + w + v + y^3 = u_2, \\ (8) \quad w = y. \end{cases}$$

Тогда решение задачи (2) – (4), (6) сведется к отысканию тройки (x, y, u) , где $x = (v, w)$, $u = (u_1, u_2)$. Приближенное решение задачи (2) – (4), (6) будем искать в виде галеркинских сумм:

$$(9) \quad \begin{aligned} \tilde{v}(s_1, s_2, t) &= \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{m_2} v_{k_1, k_2}(t) \varphi_{k_1, k_2}(s_1, s_2), \\ \tilde{w}(s_1, s_2, t) &= \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{m_2} w_{k_1, k_2}(t) \varphi_{k_1, k_2}(s_1, s_2), \\ \tilde{y}(s_1, s_2, t) &= \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{m_2} y_{k_1, k_2}(t) \varphi_{k_1, k_2}(s_1, s_2), \\ \tilde{u}_1(s_1, s_2, t) &= \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{m_2} u_{1k_1, k_2}(t) \varphi_{k_1, k_2}(s_1, s_2), \\ \tilde{u}_2(s_1, s_2, t) &= \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{m_2} u_{2k_1, k_2}(t) \varphi_{k_1, k_2}(s_1, s_2), \end{aligned}$$

где $\varphi_{k_1, k_2}(s_1, s_2) = \frac{2}{\pi} \sin(k_1 s_1) \sin(k_2 s_2)$.

Далее, будем искать приближенное решение задачи управления (1) – (4) с помощью метода штрафа, описанного в работе [3]. Рассмотрим эквивалентную задачу управления, где соотношение (8) для приближенного решения добивается с помощью введения нового функционала штрафа в виде

(10)

$$\begin{aligned} J(\tilde{x}, \tilde{u}) &= \vartheta \left(\int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b (\tilde{v} - v^d)^2 ds_2 + \right. \\ &+ \left. \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b |\nabla \tilde{v} - \nabla v^d|^2 ds_2 \right) + \theta \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b (\tilde{w} - w^d)^4 ds_2 + \\ &+ \vartheta(1 - \theta) \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b (\tilde{y} - w^d)^4 ds_2 + (1 - \vartheta) \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b (|\nabla \tilde{u}_1|^2 + \\ &+ \tilde{u}_2^{\frac{4}{3}}) ds_2 + r_\varepsilon \int_0^T dt \int_0^a ds_1 \int_0^b (\tilde{w} - \tilde{y})^4 ds_2, \end{aligned}$$

где параметр штрафа $r_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} +\infty$ при $\varepsilon \rightarrow +0$.

Опираясь на метод Рунге, будем искать неизвестные $y_{k_1, k_2}(t)$, $u_{1, k_1, k_2}(t)$, $u_{2, k_1, k_2}(t)$ в виде

$$\begin{aligned} y_{k_1, k_2}(t) &= \sum_{n=0}^N b_{k_1, k_2, n} t^n, \\ u_{1, k_1, k_2}(t) &= \sum_{n=0}^N c_{k_1, k_2, n} t^n, \\ u_{2, k_1, k_2}(t) &= \sum_{n=0}^N d_{k_1, k_2, n} t^n, \end{aligned}$$

учитывая, что

$$y_{k_1, k_2}(0) = w_{k_1, k_2}(0).$$

Подставив галеркинские суммы (9) в уравнения (7) и умножив полученное уравнение скалярно в $L_2(\Omega)$ на собственные функции $\varphi_{k_1, k_2}(s_1, s_2)$, получим систему алгебро-дифференциальных уравнений:

$$(11) \quad \begin{cases} \langle -v''_{s_1 s_1} - v''_{s_2 s_2} - w + v, \varphi_{k_1, k_2} \rangle = \langle u_1, \varphi_{k_1, k_2} \rangle, \\ \langle w'_t - 2w''_{s_1 s_1} - 2w''_{s_2 s_2} + w + v + y^3, \varphi_{k_1, k_2} \rangle = \langle u_2, \varphi_{k_1, k_2} \rangle. \end{cases}$$

Разрешим систему уравнений (11) относительно неизвестных $b_{k_1, k_2, n}$, $c_{k_1, k_2, n}$, $d_{k_1, k_2, n}$. Таким образом, задача оптимального управления сводится к нахождению минимума функции нескольких переменных относительно $b_{k_1, k_2, n}$, $c_{k_1, k_2, n}$, $d_{k_1, k_2, n}$, $k_1 = 1..m_1$, $k_2 = 1..m_2$, $n = 0..N$.

В результате вычислений было найдено приближенное решение задачи (1) – (4):

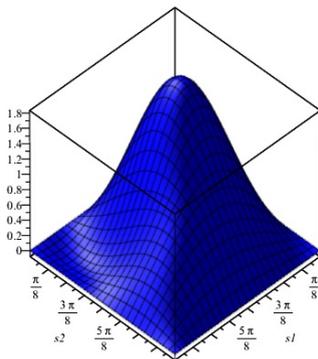
$$\begin{aligned}
 & \tilde{v}(s_1, s_2, t) = \\
 & = 0.32460325 \sin(s_1) \sin(2s_2) e^{-2t} - 0.26287907 \sin(s_1) \sin(2s_2) t^3 - \\
 & - 0.09637645 \sin(2s_1) \sin(2s_2) t^5 + 0.10868619 \sin(2s_1) \sin(2s_2) t^4 - \\
 & - 0.29119337 \sin(2s_1) \sin(s_2) + 0.65636902 \sin(s_1) \sin(s_2) + \\
 & + 0.42809576 \sin(2s_1) \sin(2s_2) - 0.18160210 \sin(s_1) \sin(2s_2) + \\
 & + 0.01036402 \sin(s_1) \sin(2s_2) t - 0.75184196 \sin(2s_1) \sin(2s_2) t + \\
 & + 0.05547544 \sin(2s_1) \sin(2s_2) t^6 + 0.18824866 \sin(2s_1) \sin(s_2) t^3 + \\
 & + 0.14928118 \sin(s_1) \sin(s_2) t^3 + 0.53815331 \sin(s_1) \sin(s_2) t^2 + \\
 & + 0.15323104 \sin(s_1) \sin(2s_2) t^2 + 0.00947512 \sin(2s_1) \sin(s_2) t^4 - \\
 & - 0.00090807 \sin(s_1) \sin(s_2) t^5 + 0.18529947 \sin(s_1) \sin(2s_2) t^4 - \\
 & - 0.09692726 \sin(s_1) \sin(s_2) t^4 + 0.78679539 \sin(2s_1) \sin(s_2) t^2 + \\
 & + 0.64075712 \sin(2s_1) \sin(2s_2) t^2 + 0.43937370 \sin(2s_1) \sin(s_2) e^{-2t} + \\
 & + 0.00183630 \sin(2s_1) \sin(s_2) t^5 - 0.02995898 \sin(2s_1) \sin(s_2) t^6 + \\
 & + 0.28726404 \sin(2s_1) \sin(s_2) t - 0.14960318 \sin(s_1) \sin(2s_2) t^3 - \\
 & - 0.05630735 \sin(s_1) \sin(2s_2) t^5 - 0.01622395 \sin(s_1) \sin(s_2) t^6 + \\
 & + 0.02001798 \sin(s_1) \sin(2s_2) t^6 + 0.97879663 t \sin(s_1) \sin(s_2) - \\
 & - 0.45421482 \sin(2s_1) \sin(2s_2) e^{-2t} + 0.13108779 \sin(s_1) \sin(s_2) e^{-2t},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \tilde{w}(s_1, s_2, t) = \\
 & = -0.29061195 \sin(s_1) \sin(s_2) + 1.2906119 \sin(s_1) \sin(s_2) + \\
 & + 1.250063536 \sin(2s_1) \sin(2s_2) - 0.25006353 \sin(2s_1) \sin(2s_2) + \\
 & + 0.03284726 \sin(s_1) \sin(2s_2) + 0.072184868 \sin(2s_1) \sin(s_2) - \\
 & - 0.00365144 \sin(s_1) \sin(s_2)t^6 + 0.011567121 \sin(2s_1) \sin(2s_2)t^6 - \\
 & - 0.01187023 \sin(2s_1) \sin(2s_2)t^5 - 0.01872493 \sin(2s_1) \sin(2s_2)t^4 - \\
 & - 0.083017596 \sin(2s_1) \sin(2s_2)t^3 + 0.27146516 \sin(2s_1) \sin(s_2)t^2 + \\
 & + 0.26070104 \sin(2s_1) \sin(s_2)t - 0.44556011 \sin(2s_1) \sin(2s_2)t + \\
 & + 0.53091998 \sin(s_1) \sin(s_2)t^2 - 0.25099702 \sin(s_1) \sin(s_2)t + \\
 & + 0.00167775 \sin(s_1) \sin(2s_2)t^6 + 0.04131579 \sin(s_1) \sin(2s_2)t^4 - \\
 & - 0.00691318 \sin(s_1) \sin(2s_2)t^5 + 0.00352998 \sin(2s_1) \sin(s_2)t^4 - \\
 & - 0.06149780 \sin(s_1) \sin(s_2)t^4 - 0.00082689 \sin(s_1) \sin(s_2)t^5 + \\
 & + 0.24086274 \sin(s_1) \sin(2s_2)t - 0.00957935 \sin(2s_1) \sin(s_2)t^6 - \\
 & - 0.01735565 \sin(2s_1) \sin(s_2)t^3 + 0.00112449 \sin(2s_1) \sin(s_2)t^5 - \\
 & - 0.07047050 \sin(s_1) \sin(2s_2)t^3 + 0.10358340 \sin(s_1) \sin(2s_2)t^2 + \\
 & + 0.07900896 \sin(2s_1) \sin(2s_2)t^2 - 0.05512904 \sin(s_1) \sin(s_2)t^3 - \\
 & - 0.07218486 \sin(2s_1) \sin(s_2) - 0.032847265 \sin(s_1) \sin(2s_2),
 \end{aligned}$$

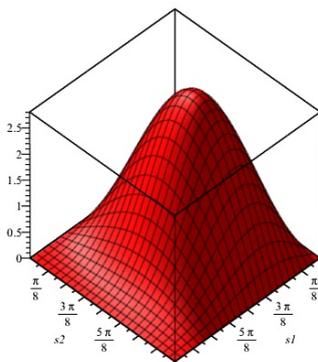
$$\begin{aligned}
 & \tilde{u}_1(s_1, s_2, t) = \\
 & = 0.53236963 \sin(s_1) \sin(2s_2)t^2 + 0.60706472 \sin(s_1) \sin(s_2)t^2 + \\
 & + 0.50723020 \sin(2s_1) \sin(2s_2)t^2 + 1.27199302 \sin(2s_1) \sin(s_2)t^2 - \\
 & - 0.80360338 \sin(s_1) \sin(2s_2)t + 0.43694503t \sin(s_1) \sin(s_2) + \\
 & + 0.23333849 \sin(2s_1) \sin(2s_2)t - 0.92083681 \sin(2s_1) \sin(s_2)t + \\
 & + 0.14300114 \sin(s_1) \sin(2s_2) - 0.21254317 \sin(s_1) \sin(s_2) - \\
 & - 1.02611905 \sin(2s_1) \sin(2s_2) + 0.14818032 \sin(2s_1) \sin(s_2),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \tilde{u}_2(s_1, s_2, t) = \\
 & = -0.41575648 \sin(s_1) \sin(2s_2)t^2 + 0.79747415 \sin(s_1) \sin(s_2)t^2 - \\
 & - 0.80282707 \sin(2s_1) \sin(2s_2)t^2 + 1.32200641 \sin(2s_1) \sin(s_2)t^2 + \\
 & + 1.15504060 \sin(s_1) \sin(2s_2)t + 1.97868413t \sin(s_1) \sin(s_2) - \\
 & - 1.29303585 \sin(2s_1) \sin(2s_2)t + 1.71680910 \sin(2s_1) \sin(s_2)t + \\
 & + 0.30776204 \sin(s_1) \sin(2s_2) + 3.37963281 \sin(s_1) \sin(s_2) + \\
 & + 220963011755121 \sin(2s_1) \sin(2s_2) + 0.47753377 \sin(2s_1) \sin(s_2),
 \end{aligned}$$

при этом значение функционала $J = 0.152053088$ (с точностью до 10^{-8}). На рисунке представлен график поверхности приближенного решения в момент времени $t = 1$.



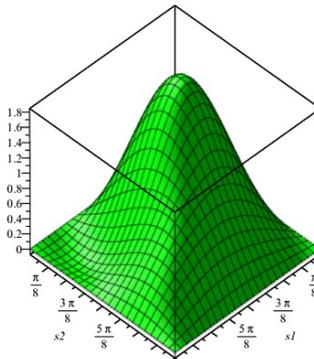
Графики функций $w(s_1, s_2, 1)$ при $t = 1$



Графики функций $y(s_1, s_2, 1)$ при $t = 1$

Литература

1. БОКАРЕВА Т.А., СВИРИДЮК Г.А. *Сборки Уитни фазовых пространств некоторых полулинейных уравнений типа Соболева* // Математические заметки. - 1994 - Т.55, /No 3. - С. 3-10
2. МАНАКОВА Н.А., ГАВРИЛОВА О.В. *Оптимальное управление для одной математической модели рас-*



Графики функций $v(s_1, s_2, 1)$ при $t = 1$

- пространения нервного импульса* // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. - 2015 - Т.8, /No 4. - С. 120-126
3. МАНАКОВА Н.А. *Метод декомпозиции в задаче оптимального управления для полулинейных моделей соболевского типа* // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. - 2015 - Т.8, /No 2. - С. 133-136
 4. FITZ HUGH R. *Mathematical Models of Threshold Phenomena in the Nerve Membrane* // Bulletin of Mathematical Biology. - 1955 - Vol. 15, /No 10. - P. 257-278
 5. NAGUMO J., ARIMOTO S., YOSHIZAWA S. *An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon* // Proceedings of the IRE. - 1962 - Vol. 17, /No 4. - P. 2061-2070

NUMERICAL SIMULATION OF CONTROL OF NERVE IMPULSE SPREADING IN THE RECTANGULAR MEMBRANE

Gavrilova Olga, South Ural State University, Chelyabinsk, student (gavrilova0812@yandex.ru).

Abstract: The numerical study of the optimal control problem for the Fitz Hugh-Nagumo model in a rectangle is considered. The Fitz Hugh-Nagumo system simulates the process of propagation of a nerve impulse in a membrane. This equation relates to semilinear Sobolev type equations, which constitute a vast area of nonclassical equations of mathematical physics. An algorithm for numerical solution of optimal control problems in a rectangle based on the modified Galerkin method and the decomposition method, and The result of a computational experiment.

Keywords: Sobolev type equations, decomposition method, numerical modelling.

УДК 62–50

ББК 30

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ¹

Кочетков С.А.²

*(Учреждение Российской академии наук Институт проблем
управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

В процессе эксплуатации асинхронного электропривода параметры, входящие в описание его математической модели, могут существенно изменяться. Данные процессы связаны с нагревом короткозамкнутой обмотки ротора, насыщением магнитопроводов ротора и статора, а также изменениями приведенного момента инерции электропривода. В статье рассмотрена задача слежения за заданным значением угловой скорости вращения электропривода в условиях неопределенности параметров математической модели, описывающей поведение электродвигателя, а также наличия внешних неконтролируемых возмущений. За счет использования нелинейного разрывного закона управления удастся обеспечить асимптотическую сходимость ошибки слежения к нулю.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, задача слежения, неизвестный момент нагрузки, релейный закон управления, неопределенность параметров.

Введение

Электроприводы различного типа (электроприводы переменного и постоянного тока) широко используются в качестве испол-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента МД–5366.2016.8 и гранта РФФИ №15–08–01543А.

² Сергей Александрович Кочетков, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, kos@ipu.ru.

нительных устройств в подавляющем большинстве электромеханических систем: роботов-манипуляторов, мобильных роботах, электромобилях, токарных станках, прокатных станах и т.д. Основной из задач, которая ставится перед разработчиками систем управления подобными установками, является задача слежения за заданным сигналом. В наиболее общей постановке данная проблема должна решаться с помощью современных достижений теории управления в условиях неопределенности параметров объекта и внешней среды.

В данной работе рассмотрена задача слежения за заданной скоростью вращения вала асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Основные особенности предложенной постановки задачи.

1. Неопределенности в описании математической модели электропривода, связанные:

- с изменением активного сопротивления ротора из-за нагрева проводников;
- с нелинейностью характеристики намагничивания магнитопроводов, приводящей к нелинейной зависимости магнитных потоков статора и ротора и их токов намагничивания;
- с неопределенностью приведенного момента инерции электропривода.

2. Воздействие на систему внешней нагрузки, не поддающейся описанию в виде статических зависимостей или динамических математических моделей. Предполагается, что каналы воздействия нагрузки и каналы управлений не совпадают, что соответствует так называемому случаю несогласованных возмущений [6].

Описанные нюансы предложенной постановки задачи не позволяют воспользоваться существующими подходами к решению поставленной задачи на основе классической теории линейных систем [7, 8], теории адаптивных систем [10], теории скользящих режимов [5], теории наблюдателей состояния [Krasnova], и

обуславливают необходимость разработки новых нелинейных законов управления [9].

1. Постановка задачи

Рассмотрим стандартную модель асинхронного электродвигателя в двухфазной системе координат, связанной с ротором двигателя (α - β -координатная система):

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(\Gamma - \Gamma_L) = \frac{1}{J} \left\{ \frac{3L_m}{2L_r} p(\psi_{r\alpha} I_{s\beta} - \psi_{r\beta} I_{s\alpha}) - \Gamma_L \right\} \\
 \dot{\psi}_{r\alpha} &= -\frac{1}{T_r} \psi_{r\alpha} - p\omega \psi_{r\beta} + \frac{L_m}{T_r} I_{s\alpha}, \\
 \dot{\psi}_{r\beta} &= -\frac{1}{T_r} \psi_{r\beta} + p\omega \psi_{r\alpha} + \frac{L_m}{T_r} I_{s\beta}, \\
 \dot{I}_{s\alpha} &= \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \left\{ u_{s\alpha} - \left(R_s + \frac{L_m^2}{L_r T_r} \right) I_{s\alpha} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{L_m}{L_r} \left[\frac{1}{T_r} \psi_{r\alpha} + p\omega \psi_{r\beta} \right] \right\}, \\
 \dot{I}_{s\beta} &= \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \left\{ u_{s\beta} - \left(R_s + \frac{L_m^2}{L_r T_r} \right) I_{s\beta} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{L_m}{L_r} \left[\frac{1}{T_r} \psi_{r\beta} - p\omega \psi_{r\alpha} \right] \right\},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где константы и переменные приведены в таблице 1.

Предполагается, что момент неизвестной механической нагрузки описывается ограниченной функцией с ограниченными двумя первыми производными

$$\left| \Gamma_L^{(i)}(t) \right| \leq \Gamma_b^i, \quad i = \overline{0, 2},
 \tag{2}$$

где $\Gamma_L^{(i)}(t)$ обозначает i -ю производную от $\Gamma_L(t)$, $\Gamma_b^i = \text{const} > 0$ – известные константы; здесь и далее, $|\cdot|$ обозначает модуль числа.

Физически, момент нагрузки Γ_L соответствует внешней нагрузке на вал электродвигателя, связанной с приводимыми в движение внешними механизмами.

Перепишем уравнения системы (1) в более компактной форме

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(\Gamma - \Gamma_L) = \frac{1}{J}(c_5 \psi^T T^T I - \Gamma_L), \\
 \dot{\psi} &= -P(\omega)\psi + c_4 I, \\
 \dot{I} &= c_1 [c_2 P(\omega)\psi - a_1 I + U],
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Таблица 1. Переменные и константы асинхронного двигателя и механической нагрузки.

Константа	Определение
L_s	индуктивность статора
L_r	индуктивность ротора
L_m	взаимная индуктивность между статором и ротором
R_s	сопротивление статора
R_r	сопротивление ротора
T_r	постоянная времени ротора, L_r/R_r
p	число пар полюсов статора
J	приведенный момент инерции
Переменная	Определение
$I_{s\alpha}$	α -компонента тока статора
$I_{s\beta}$	β -компонента тока статора
$\psi_{r\alpha}$	α -компонента потокосцепления ротора
$\psi_{r\beta}$	β -компонента потокосцепления ротора
$u_{s\alpha}$	α -компонента напряжения статора
$u_{s\beta}$	β -компонента напряжения статора
Γ	момент, развиваемый двигателем
Γ_L	момент механической нагрузки двигателя
ω	угловая скорость ротора

где $\psi^T = [\psi_{r\alpha} \ \psi_{r\beta}]$, $I^T = [I_{s\alpha} \ I_{s\beta}]$, $c_2 = \frac{L_m}{L_r}$,
 $U^T = [u_{s\alpha} \ u_{s\beta}]$, $c_1 = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2}$, $c_4 = \frac{L_m}{T_r}$, $c_5 = \frac{3pL_m}{2L_r}$,
 $a_1 = R_s + \frac{L_m^2}{L_r T_r}$.

Приняты следующие обозначения

$$(4) \quad P(\omega) = \begin{pmatrix} c_3 & p\omega \\ -p\omega & c_3 \end{pmatrix}, T = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

где $c_3 = 1/T_r$.

Параметры J , c_{in} , $i = \overline{1, 5}$ системы (3) являются постоянными неизвестными величинами, при этом технически заданы границы интервалов, к которым принадлежат их значения, а также их номинальные значения J_n , c_{in} , $i = \overline{1, 5}$

$$(5) \quad J = \text{const} > 0, \ c_i = \text{const} > 0$$

$$J_{\min} \leq J \leq J_{\max}, \ c_{i \min} \leq c_i \leq c_{i \max},$$

где $c_{i \min} = \text{const} > 0$, $c_{i \max} = \text{const} > 0$, $J_{\min} = \text{const} > 0$,
 $J_{\max} = \text{const} > 0$.

Введем в рассмотрение желаемые значения угловой скорости и модуля вектора магнитного потокосцепления ротора

$$(6) \quad \omega_d(t) = \text{var}, \ \psi_d(t) = \text{var} > 0,$$

$$|\omega_d^{(i)}(t)| \leq W_d^i, \ |\psi_d^{(i)}(t)| \leq \Psi_d^i, \ i = \overline{0, 3}$$

где $W_d^i = \text{const} > 0$, $\Psi_d^i = \text{const} > 0$ – известные константы, $\omega_d^{(i)}(t)$, $\psi_d^{(i)}(t)$ обозначают i -е производные от переменных $\omega_d(t)$, $\psi_d(t)$, численные значения которых известны точно.

При указанных ограничениях (2), (5)–(6), а также в предположении, что все переменные системы (3) доступны измерению, в статье ставится задача асимптотического слежения за заданными значениями угловой скорости ротора $\omega_d(t)$ и модуля вектора магнитного потокосцепления ротора $\psi_d(t)$

$$(7) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} |\bar{\omega}(t)| = 0, \ \lim_{t \rightarrow \infty} |\bar{\psi}(t)| = 0,$$

где $\bar{\psi}(t) = \|\psi(t)\| - \psi_d(t)$, $\|\psi(t)\| = \psi_{r\alpha}^2(t) + \psi_{r\beta}^2(t)$,
 $\bar{\omega}(t) = \omega(t) - \omega_d(t)$.

В следующем разделе рассмотрен синтез закона управления, обеспечивающего решение поставленной задачи.

2. Синтез алгоритма управления

Процедура синтеза робастного закона управления асинхронным электроприводом базируется на использовании декомпозиционного подхода на основе пошаговой процедуры и базового алгоритма управления, разработанного в публикации [13]

Шаг 1. Запишем дифференциальное уравнение для модуля вектора потокосцепления на основе (3)

$$\frac{d\|\psi\|}{dt} = \psi^T \dot{\psi} + \dot{\psi}^T \psi = -2(c_3\|\psi\| - c_4\psi^T I).$$

Объединяя данное уравнения с первым уравнением системы (3), получим производные от ошибок слежения с учетом (7)

$$(8) \quad \begin{aligned} \dot{\bar{\omega}} &= \frac{1}{J} [c_5 \psi^T T^T I - \Gamma_L(t)] - \omega_d^{(1)}(t), \\ \dot{\bar{\psi}} &= -2(c_3\|\psi\| - c_4\psi^T I) - \psi_d^{(1)}(t). \end{aligned}$$

В дальнейшем для синтеза робастного закона управления будем использовать номинальные значения параметров асинхронного электропривода. На первом шаге введем вспомогательные переменные на основе алгебраических

$$(9) \quad \begin{aligned} \frac{1}{J_n} c_{5n} \psi^T T^T I &= \tilde{I} + \omega_d^{(1)}(t), \\ 2c_{4n} \psi^T I &= \tilde{\psi} + \psi_d^{(1)}(t) \end{aligned}$$

и дифференциальных уравнений

$$(10) \quad \begin{aligned} \dot{\tilde{I}} &= -\alpha_1 \tilde{I} - \beta_1 \bar{\omega} - M_1 \text{sign}(\bar{\omega}), \\ \dot{\tilde{\psi}} &= -\alpha_2 \tilde{\psi} - M_2 \text{sign}(\bar{\psi}), \end{aligned}$$

где $\alpha_i = \text{const} > 0$, $\beta_i = \text{const} > 0$, $M_i = \text{const} > 0$ – параметры внутреннего виртуального контроллера, $\text{sign}(\cdot)$ – функция знака, доопределенная в смысле Филиппова А.Ф. [12]

$$\text{sign}(\bar{\omega}) = \begin{cases} 1, & \text{при } \bar{\omega} > 0; \\ -1, & \text{при } \bar{\omega} < 0; \\ \in [-1, 1], & \text{при } \bar{\omega} = 0. \end{cases}$$

Уравнения (10) реализуются в вычислительной среде. В связи с этим начальные условия для интеграторов (10) могут быть вы-

браны произвольным образом. В дальнейшем при синтезе реальных управляющих воздействий удобно выбрать начальные условия следующим образом

$$(11) \quad \begin{aligned} \tilde{I}(t_0) &= \frac{1}{J_n} c_{5n} \psi^T(t_0) T^T I(t_0) - \omega_d^{(1)}(t_0), \\ \tilde{\psi}(t_0) &= 2c_{4n} \psi^T(t_0) I(t_0) - \psi_d^{(1)}(t_0), \end{aligned}$$

где t_0 – начальный момент времени.

На следующем шаге за счет выбора реальных управляющих воздействий будут обеспечены соотношения (9). Далее будет показано, как выбрать параметры внутреннего контроллера, чтобы обеспечить решение поставленной задачи при выполнении (9). Объединяя уравнения (8)–(10), получим

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\omega}} &= \frac{c_5}{J} \frac{J_n}{c_{5n}} \tilde{I} + f_1(t), \quad \dot{\tilde{I}} = -\alpha_1 \tilde{I} - \beta_1 \bar{\omega} - M_1 \text{sign}(\bar{\omega}); \\ \dot{\bar{\psi}} &= -2c_3 \bar{\psi} + \frac{c_4}{c_{4n}} \tilde{\psi} + f_2(t), \quad \dot{\tilde{\psi}} = -\alpha_2 \tilde{\psi} - M_2 \text{sign}(\bar{\psi}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{где } f_1(t) &= -\frac{\Gamma_L(t)}{J} + \omega_d^{(1)}(t) \left[\frac{c_5}{J} \frac{J_n}{c_{5n}} - 1 \right], \\ f_2(t) &= \psi_d^{(1)}(t) \left[\frac{c_4}{c_{4n}} - 1 \right] - 2c_3 \psi_d(t). \end{aligned}$$

Введем новые переменные

$$I^* = \frac{c_5}{J} \frac{J_n}{c_{5n}} \tilde{I} + f_1(t), \quad \psi^* = -2c_3 \bar{\psi} + \frac{c_4}{c_{4n}} \tilde{\psi} + f_2(t)$$

и перепишем последнюю систему в новых обозначениях

$$(12) \quad \begin{aligned} \dot{\bar{\omega}} &= I^*, \quad \dot{I}^* = -\alpha_1 I^* - c_\omega \beta_1 \bar{\omega} - c_\omega M_1 \text{sign}(\bar{\omega}) + \xi_1(t); \\ \dot{\bar{\psi}} &= \psi^*, \quad \dot{\psi}^* = -(2c_3 + \alpha_2) \psi^* - 2c_3 \alpha_2 \bar{\psi} - \\ &\quad - c_\psi M_2 \text{sign}(\bar{\psi}) + \xi_2(t), \end{aligned}$$

где $\xi_1(t) = \alpha_1 f_1(t) + \dot{f}_1(t)$, $\xi_2(t) = \alpha_2 f_2(t) + \dot{f}_2(t)$, $c_\omega = \frac{c_5}{J} \frac{J_n}{c_{5n}}$, $c_\psi = \frac{c_4}{c_{4n}}$.

Для возмущений $\xi_1(t)$, $\xi_2(t)$ и их первых двух производных согласно ограничениям (2), (5)–(6) справедливы неравенства

$$(13) \quad \begin{aligned} |\xi_1(t)| &\leq \Sigma_1, \quad |\dot{\xi}_1(t)| \leq \bar{\Sigma}_1, \quad |\xi_2(t)| \leq \Sigma_2, \quad |\dot{\xi}_2(t)| \leq \bar{\Sigma}_2, \\ \Sigma_1 &= \alpha_1 \Gamma_b^0 / J + \Gamma_b^1 / J + \alpha_1 k_\omega W_d^1 + k_\omega W_d^2, \\ \bar{\Sigma}_1 &= \alpha_1 \Gamma_b^1 / J + \Gamma_b^2 / J + \alpha_1 k_\omega W_d^2 + k_\omega W_d^3, \\ \Sigma_2 &= \alpha_2 (k_\psi \Psi_d^1 + 2c_{3\max} \Psi_d^0) + k_\psi \Psi_d^2 + 2c_{3\max} \Psi_d^1, \\ \bar{\Sigma}_2 &= \alpha_2 (k_\psi \Psi_d^2 + 2c_{3\max} \Psi_d^1) + k_\psi \Psi_d^3 + 2c_{3\max} \Psi_d^2, \end{aligned}$$

где $k_\omega = \max \left\{ \frac{c_{5\max} J_n}{J_{\min} c_{5n}} - 1, 1 - \frac{c_{5\min} J_n}{J_{\max} c_{5n}} \right\}$,

$k_\psi = \max \left\{ \frac{c_{4\max}}{c_{4n}} - 1, 1 - \frac{c_{4\min}}{c_{4n}} \right\}$.

Введем обозначения

$$(14) \quad c_{\omega \min} = \frac{c_{5 \min} J_n}{J_{\max} c_{5n}}, \quad c_{\psi \min} = \frac{c_{4 \min}}{c_{4n}}.$$

и сформулируем основной результат работы.

Теорема 1. Пусть параметры внутреннего контроллера (9)–(10) выбраны согласно неравенствам

$$(15) \quad \begin{aligned} c_{\omega \min} M_1 > \Sigma_1, \quad \alpha_1 (c_{\omega \min} M_1 - \Sigma_1) > 2\bar{\Sigma}_1; \\ c_{\psi \min} M_2 > \Sigma_2, \quad \alpha_2 (c_{\psi \min} M_2 - \Sigma_2) > \bar{\Sigma}_2. \end{aligned}$$

Тогда (12) переменные системы сходятся к нулю экспоненциально.

Доказательство. В силу ограниченности статьи рассмотрим доказательство сходимости только для переменной $\bar{\omega}$ в случае, когда $\alpha_1^2/4 - c_\omega \beta_1 \neq 0$. Доказательство сходимости для системы относительно переменных $\bar{\psi}, \psi^*$ можно, например, найти в [9].

Введем новые переменные

$$y_1 = |\alpha_1^2/4 - c_\omega \beta_1|^{0.5} \bar{\omega}, \quad y_2 = \frac{\alpha_1}{2} \bar{\omega} + I^*,$$

и перепишем первое уравнение системы (12) в новых координатах

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= -\frac{\alpha_1}{2} y_1 + \gamma_1 y_2, \\ \dot{y}_2 &= \gamma_2 y_1 - \frac{\alpha_1}{2} y_2 - c_\omega M_1 \operatorname{sign}(y_1) + \xi(t), \end{aligned}$$

где $\gamma_1 = \gamma_2 = |\alpha_1^2/4 - c_\omega \beta_1|^{0.5}$ при $\alpha_1^2/4 - c_\omega \beta_1 > 0$;

$\gamma_2 = -\gamma_1 = -|\alpha_1^2/4 - c_\omega \beta_1|^{0.5}$ при $\alpha_1^2/4 - c_\omega \beta_1 < 0$.

Запишем производная от положительно полуопределенной функции Ляпунова

$$(16) \quad V_1 = \frac{|y_1|}{\gamma_1} - \frac{\xi}{\gamma_1 c_\omega M_1} y_1 + \frac{y_1^2}{2c_\omega M_1} + \frac{y_2^2}{2c_\omega M_1}$$

вдоль траекторий системы (12)

$$(17) \quad \begin{aligned} \dot{V}_1 &= -\frac{\alpha_1}{2\gamma_1} |y_1| + \frac{\alpha_1 \xi}{2\gamma_1 c_\omega M_1} y_1 - \frac{\xi}{\gamma_1 c_\omega M_1} y_1 - \\ &- \frac{\alpha_1}{2c_\omega M_1} y_1^2 + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{c_\omega M_1} y_1 y_2 - \frac{\alpha_1}{2c_\omega M_1} y_2^2 \leq \\ &\leq x^T Q x - \bar{\alpha} |y_1| \leq \lambda_{\max}(Q) [y_1^2 + y_2^2] - \bar{\alpha} |y_1|, \end{aligned}$$

где $x^T = (y_1 \ y_2)$, $Q = \begin{pmatrix} -\frac{\alpha_1}{2M_1} & \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2c_\omega M_1} \\ \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2c_\omega M_1} & -\frac{\alpha_1}{2c_\omega M_1} \end{pmatrix}$,

$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1}{2\gamma_1 c_\omega M_1} \left(c_\omega M_1 - \Sigma - \frac{2\Sigma}{\alpha_1} \right)$, $\lambda_{\max}(Q)$ – максимальное собственное число матрицы Q .

Вычисляя собственные числа матрицы Q , легко показать, что квадратичная форма $x^T Q x$ отрицательно определена $\forall \alpha_1 > 0$, $\beta_1 > 0$, $M_1 > 0$. Из условий (15) теоремы 1 следует, что $\bar{\alpha} > 0$ для всех значений c_ω из диапазона (5) и производная функции Ляпунова V_1 отрицательна всюду кроме начала координат.

Для функции (16) напомним верхнюю оценку

$$V_1 \leq \frac{|y_1|}{\gamma_1} \left(1 + \frac{\Sigma}{c_\omega M_1} \right) + \frac{1}{2c_\omega M_1} (y_1^2 + y_2^2) \leq c_0 (|y_1| + y_1^2 + y_2^2)$$

где $c_0 = \max \left\{ \frac{1 + \frac{\Sigma}{c_\omega M_1}}{\gamma_1}, \frac{1}{2c_\omega M_1} \right\}$.

Перепишем (17) с учетом последнего неравенства

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq \lambda_{\max}(Q) [y_1^2 + y_2^2] - \bar{\alpha} |y_1| \leq \\ &\leq -\bar{c}_1 (|y_1| + y_1^2 + y_2^2) \leq -\gamma V_1, \end{aligned}$$

где $\gamma = \frac{\bar{c}_1}{c_0}$, $\bar{c}_1 = \min \{ |\lambda_{\max}(Q)|, \bar{\alpha} \}$.

Для переменной y_1 при произвольных начальных условиях, заданных в момент времени t_0 , запишем оценку

$$|y_1(t)| \leq V_0 e^{-\gamma(t-t_0)} \Rightarrow |\bar{\omega}(t)| \leq Y_0 e^{-\gamma(t-t_0)}, \forall t > t_0,$$

где

$$\begin{aligned} V_0 &= |y_1(t_0)| \gamma_1 \left(1 + \frac{\Sigma}{c_\omega M_1} \right) + \frac{1}{2c_\omega M_1} ([y_1(t_0)]^2 + [y_2(t_0)]^2), \\ Y_0 &= |\alpha_1^2/4 - c_\omega \beta_1|^{-0.5} V_0. \end{aligned}$$

Шаг 2. На предыдущем шаге было показано, что если параметры внутреннего контроллера (9)–(11) были выбраны согласно неравенствам (15), то ошибки слежения за заданными траекториями стремятся к нулю экспоненциально. На втором шаге было должно принудительно обеспечить соотношения (9)–(10) за счет выбора реальных управляющих воздействий $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$. Как обычно в теории электропривода [1], зададим желаемые значения токов статора в двухфазной системе координат из равенств (9)

$$(18) \quad I_d = \begin{pmatrix} I_{d\alpha} \\ I_{d\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{\|\psi\|} \begin{pmatrix} -\psi_{r\beta} & \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\alpha} & \psi_{r\beta} \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} \frac{J_n}{c_{\beta n}} [\tilde{I} + \omega_d^{(1)}(t)] \\ \frac{1}{2c_{4n}} [\tilde{\psi} + \psi_d^{(1)}(t)] \end{bmatrix},$$

где суффикс d означает желаемые значения токов статора в $\alpha\beta$ координатной системе.

To realize such desired stator current components the different switching technique can be applied based on modern PWM converters. From one hand, in $\alpha\beta$ coordinate frame stator voltage components u_α , u_β may be chosen as discontinuous control inputs, and then they can be realized in the three-phase coordinate system with appropriate choice of time moments of switching of each voltage. From the other hand, the desired current components (18) may be recalculated in three-phase coordinate system and then used as reference values for PWM realization. Let us consider these two cases.

Case A. Discontinuous control synthesis in $\alpha\beta$ coordinate system.

Now we are ready to establish the real control input. It is well known, that in induction motor the discontinuous control is used specifically to operate with an inverter. In this case using sliding mode theory is suitable [?]. Due to this reason, let us introduce sliding variables

$$(19) \quad s_\alpha = I_\alpha - I_{d\alpha}, \quad s_\beta = I_\beta - I_{d\beta}.$$

The components of stator voltage are chosen in the discontinuous form

$$(20) \quad u_\alpha = -U_{0\alpha} \text{sign}(s_\alpha), \quad u_\beta = -U_{0\beta} \text{sign}(s_\beta),$$

where $U_{0\alpha}$, $U_{0\beta}$ are the constant power supply voltage.

The dynamics of sliding mode variables are governed by equations

$$\dot{s} = c_1[c_2P(\omega)\psi - a_1(s + I_d) - U_0\text{sign}(s)] - \dot{I}_d,$$

where $s = (s_\alpha, s_\beta)^T$, $\text{sign}(s) = [\text{sign}(s_\alpha), \text{sign}(s_\beta)]^T$,

$U_0 = \text{diag}(U_{0\alpha}, U_{0\beta})$.

Taking into account (18) and combining the last equation with the dynamics of the inner loop controller, one can write the full dynamic of the closed loop system

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c_1[c_2P(\omega)\psi - a_1(s + I_d) - U_0\text{sign}(s)] - \dot{I}_d, \\ \dot{\bar{\omega}} &= \tilde{I} + \frac{c_5}{J}c_5\psi^T T^T s - \frac{\Gamma_L(t)}{J}, \\ (21) \quad \dot{\tilde{I}} &= -\alpha_1\tilde{I} - \beta_1\bar{\omega} - M_1\text{sign}(\bar{\omega}), \\ \dot{\bar{\psi}} &= \tilde{\psi} + 2c_4\psi^T s, \\ \dot{\tilde{\psi}} &= -\alpha_2\tilde{\psi} - \beta_2\bar{\psi} - M_2\text{sign}(\bar{\psi}). \end{aligned}$$

According to (11) if the conditions

$$\begin{aligned} U_{0\alpha} &> \left| c_1[c_2(c_3\psi_\alpha + p\omega\psi_\beta) - a_1(s_\alpha + I_{d\alpha})] - \dot{I}_{d\alpha} \right|, \\ U_{0\beta} &> \left| c_1[c_2(-p\omega\psi_\alpha + c_3\psi_\beta) - a_1(s_\beta + I_{d\beta})] - \dot{I}_{d\beta} \right| \end{aligned}$$

are fulfilled, then sliding mode arises in the system (21) from the initial moment of time t_0 ($s(t) = 0$) and its dynamical order is reduced to the system (12), which is exponentially stable under conditions of the theorem 1.

Case B. Discontinuous control synthesis in three-phase coordinate system.

The desired stator currents in three phase coordinates can be calculated from (18) with the help of transformation matrix

$$(22) \quad I_{sd} = \begin{pmatrix} I_{sda} \\ I_{sdb} \\ I_{sdc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{d\alpha} \\ I_{d\beta} \end{pmatrix},$$

where I_{sda} , I_{sdb} , I_{sdc} are the desired stator components in the three phase coordinate system.

From (22) one can choose the sliding surfaces in the form

$$(23) \quad s_a = I_{sa} - I_{sda}, \quad s_b = I_{sb} - I_{sdb}, \quad s_c = I_{sc} - I_{sdc},$$

where I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} are measured stator components.

To organize sliding motion on the surfaces (23) the axes components of stator voltage u_a , u_b , u_c are chosen in the form

$$(24) \quad \begin{aligned} u_a &= -U_s \text{sign}(s_a), \quad u_b = -U_s \text{sign}(s_b), \\ u_c &= -U_s \text{sign}(s_c), \end{aligned}$$

where U_s is the constant power supply voltage.

As in the previous case, if the value of U_s is sufficiently large, then sliding mode arises in the state of space of the system and the stated problem (7) is solved.

2.1. Automatic start algorithm

There are two singularities in the desired current components (18). First one is concerned with reference functions $\omega_d(t)$, $\psi_d(t)$, and due to this reason the class of these functions is bounded by condition (6). Also, the system (3) can start from zero initial conditions with $\|\psi(0)\| = 0$. In this case from relations (18), (22) we get infinite desired values of stator current components. To avoid this problem we need to start our control algorithm from some moment of time t_{\min} , when

$$\|\psi(t_{\min})\| > \|\psi\|_{\min},$$

where $\|\psi\|_{\min}$ is some value of the rotor magnetic flux after which the automatic start algorithm is finished. For this reason designers must establish some automatic start algorithm, which provides non-zero rotor magnetic flux. For example, for the case (20) the maximum voltage is applied to both phase until the estimated rotor magnetic flux has grown sufficiently.

Thus, if

$$\|\psi\| < \|\psi\|_{\min},$$

then

$$(25) \quad u_\alpha = U_{0\alpha} \text{sign}(I_\alpha), \quad u_\beta = U_{0\beta} \text{sign}(I_\beta).$$

According to this relation the angle of rotor flux has maximum growth speed to bisector of straight angle.

In the case (24), if

$$\|\psi\| < \|\psi\|_{\min},$$

then

$$u_{sa} = U_s \text{sign}(I_a), \quad u_{sb} = -U_s \text{sign}(I_b), \quad u_{sb} = -U_s \text{sign}(I_b).$$

From (22) one can conclude, that in this case α axis component of rotor magnetic flux have the maximum growth speed.

3. Заключение

В статье была рассмотрена задача регулирования за заданной скоростью вала асинхронного электродвигателя с независимым управлением угловой скоростью и потокосцеплением ротора при воздействии внешнего неизвестного момента механической нагрузки заданного класса. Разработанный закон управления базируется на разрывной функции, которая легко может быть реализована в современных ключевых преобразователях энергии. Теоретические результаты могут найти широкое применение в различных прикладных задачах [11]. Дальнейшие исследования могут быть связаны с робастной постановкой задачи, когда параметры асинхронного электропривода (сопротивления обмоток ротора и статора, индуктивностей, моментов инерции и т.д.) точно неизвестны.

Литература

1. TSYPKIN YA. Z. *Relay Control Systems*. – Cambridge: PlaceTypeUniversity Press, 1984.
2. UTKIN A. V., HUANG H. NGUEN. *Control of DC Electric Motor // Autom. Remote Control*. – 2006. – Vol. 67, № 5. – P. 767-782.

3. UTKIN A. V. *Problems of Control of an Asynchronous Motor* // Autom. Remote Control. – 1993. – Vol. 54, № 12. – P. 1769-1779.
4. DODDS J.S., UTKIN V.A., VITTEK J. *Sensorless Induction Motor Drive with Independent Speed and Rotor Magnetic Flux Control. Part 1. Theoretical Background* // J. Electrical Eng. – 1998. – Vol. 49, № 7. – P. 186-193.
5. UTKIN V.I., GULDNER J. AND J. SHI. *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. – London: Tailor and Francis, 2009.
6. DRAZENOVIC B. *The Invariance Conditions in Variable Structure Systems* // Automatica. – 1969. – Vol. 5, № 3. – P. 287-295.
7. WONHAM W.M. *Linear Multivariable Control: A Geometric Approach*. – New York: Springer, 1979.
8. UTKIN V.A. *Invariance and Independence in Systems with Separable Motion* // Autom. Remote Control. – 2001. – Vol. 62, № 11. – P. 1825-1843.
9. KOCHETKOV S.A., UTKIN V.A. *Invariance in Systems with Unmatched Perturbations* // Autom. Remote Control. – 2013. – Vol. 74, № 7. – P. 1097-1127.
10. MARINO R., TOMEI P., AND VERRELLI C. *An adaptive tracking control from current measurements for induction motors with uncertain load torque and rotor resistance* // Automatica. – 2008. – Vol. 44, № 10. P. 2593–2599.
11. KOCHETKOV S.A., UTKIN V.A. *Method of Decomposition in Mobile Robot Control* // Autom. Remote Control. – 2011. – Vol. 72, № 10. – P. 2084-2099.
12. ФИЛИППОВ А.Ф. *ДИФУРЫ* // Труды ЧНННННН. – 2011. – Vol. 72, № 10. – P. 2084-2099.
13. КОЧЕТКОВ С.А. *Управление асинхронником* // Труды ЧНННННН. – 2011. – Vol. 72, № 10. – P. 2084-2099.

ROBUST CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE UNDER PERTURBATIONS

Sergei Kochetkov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science (kos@ipu.ru).

Abstract: In the process of operation of an asynchronous electric drive, the parameters included in the description of its mathematical model can change significantly. These processes are associated with heating short-circuited winding of the rotor, saturation of the magnetic conductors of the rotor and stator, as well as changes in the above moment of inertia of the electric drive. In the article the task of tracking the set value of the angular speed of rotation of the electric drive under conditions of uncertainty of parameters of a mathematical model describing the behavior of an electric motor, as well as the presence of external uncontrolled disturbances are presented. Due to the use of the nonlinear discontinuous control law, it is possible to ensure the asymptotic convergence of the error tracking to zero.

Keywords: asynchronous electric drive, tracking task, unknown load moment, relay control law, uncertainty of parameters.

2. УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 316.776

ББК 60.524

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ГРАФОВ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ¹

Гилязова А.А.²

*(Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

В работе рассмотрена новая версия алгоритма с отсевом активных узлов для построения случайных ориентированных графов со статистическими свойствами, схожими с реальными онлайн-социальными сетями. Численно показано, что модификация, заключающаяся в добавлении механизма отсева активных узлов по ответным связям, улучшила большинство показателей результирующих графов.

Ключевые слова: онлайн-социальные сети, ориентированный вебграф, модели роста, алгоритм, отсев активных узлов.

1. Введение

Онлайн-социальные сети представляют собой актуальный объект для научных исследований, в частности, потому, что на их примере возможно изучать закономерности, характерные для тех социальных сетей, из которых состоит общество. Кроме

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-01-00820\17 от 31.03.2017 г.

² Альбина Ахтямовна Гилязова, младший научный сотрудник (giliazova@mail.ru).

того, такие исследования могут иметь и прикладное значение, например, для оптимизации показа рекламы в онлайн-социальных сетях, для прогнозирования динамики развития онлайн-социальных сетей и пр.

Известно, что в этих социальных сетях наблюдаются статистические характеристики, в своей совокупности характерные именно для социальных сетей, а не сетей другой природы (биологической, техногенной). С другой стороны, есть некоторые характеристики, которые встречаются в различных прикладных областях, такие как безмасштабность (степенное распределение степеней вершин графа). Существует ряд моделей, пытающихся объяснить эти характеристики, среди которых отметим популярные модели с предпочтительным присоединением [3].

В данной работе исследуется алгоритм с отсевом активных узлов, который не использует механизм предпочтительного присоединения. Тем не менее ранее было численно показано, что с помощью этого алгоритма возможно строить неориентированные случайные графы, схожие с реальными социальными сетями по ряду статистических характеристик, включая такие значимые, как вид распределения степеней вершин и коэффициент ассортативности [1]. Такие графы могут в дальнейшем быть использованы для моделирования процессов распространения информации в онлайн-социальных сетях, прогнозирования динамики их развития и др. Здесь мы продолжим исследования вариаций этого алгоритма для случая ориентированных графов, поскольку многие из реальных онлайн-социальных сетей представляются именно в форме ориентированных графов.

2. Описание алгоритма

В основе алгоритма лежит модель, согласно которой поведение пользователей онлайн-социальной сети меняется со временем. На начальном этапе, продолжительность которого разная для разных пользователей, они активно накапливают новые связи (например, связи дружбы). Затем, сформировав свой

круг общения, они далее общаются преимущественно внутри него. Либо они могут и вовсе покинуть социальную сеть, причём, как правило, при этом их учётная запись сохраняется со всеми имеющимися связями и продолжает учитываться при расчёте статистических характеристик.

Алгоритм для неориентированных графов. Начальный граф пустой. На каждом шаге добавляются новые активные узлы в заданном количестве. Далее на каждом шаге активные узлы с заданной вероятностью образуют новые ненаправленные связи, которые равновероятно распределяются по другим активным узлам. Затем в конце каждого шага происходит «отсев» – прекращение активности заданной доли активных узлов с вероятностью, обратно пропорциональной числу их связей, включая петли, при этом узлы и их связи не удаляются из сети.

Возможно несколько вариаций этого алгоритма для ориентированных графов. Ранее была исследована модель, в которой новым узлам сети присваиваются статусы двух видов: активный по исходящим связям и активный по входящим связям. На каждом шаге все узлы, активные по исходящим связям, генерируют по заданному числу исходящих связей, которые равновероятно распределяются по всем узлам, активным по входящим связям. Далее на каждом шаге происходит «отсев» независимо по каждому из двух видов статусов.

Выяснилось, что такой алгоритм формирует граф, обладающий требуемой формой распределения степеней вершин, но явно недостаточным количеством взаимных связей, по сравнению с реальными онлайн-социальными сетями (такими, как, например, «Живой журнал»). Поэтому в данной работе исследуется модель, в которой сделана дополнительная модификация, а именно для узлов сети введён параметр статуса активности по ответным связям, по которому также происходит независимый отсев. При образовании входящей связи узлы, активные по ответным связям, дополнительно формируют в направлении её источника исходящую (взаимную) связь.

3. Результаты моделирования

Для оценки того, насколько велик разброс статистических характеристик получаемых случайных графов и для сравнения с предыдущей версией алгоритма без дополнительного механизма ответных связей, рассмотрим 10 образцов таких графов размером 50 000 узлов, рассчитанных с одинаковыми начальными параметрами: 100 новых узлов на каждом шаге, вероятность образования новой связи активным узлом 40 %, вероятность деактивации 10 %.

График распределения степеней вершин, как и в предыдущей версии алгоритма, имеет требуемую форму (рис. 1, 2) со значением целевого параметра в диапазоне от $-2,1$ до $-1,9$, в среднем $-2,0$ для исходящих связей и $-2,1$ для входящих связей, что весьма близко к ожидаемому $\sim -2,1$ [2].



Рис. 1. Пример распределения входящих степеней узлов

В получившихся графах число входящих связей равно числу исходящих связей и составляет от 489 196 до 494 080,

в среднем 491 149, что на 40 % больше, чем в версии алгоритма без механизма ответных связей. Средняя степень графов также выше и составляет от 9,8 до 11,8, в среднем 10,1 для исходящих связей и 11,0 для входящих связей. Максимальная степень тоже значительно выше и с большим диапазоном разброса значений, составляя от 578 до 2798, в среднем 1400 для исходящих связей и 1535 для входящих связей. Тем не менее эти показатели по-прежнему ниже, чем в реальных онлайн-социальных сетях, что связано с меньшим размером образцов.

По тем же причинам плотность графов, которая и была выше, чем в реальных онлайн-социальных сетях, стала ещё выше и составила от $1,196 \cdot 10^{-4}$ до $1,197 \cdot 10^{-4}$, в среднем $1,196 \cdot 10^{-4}$. Число узлов, не имеющих связей, осталось примерно тем же и составило 37 200–38 300, в среднем 37 720.

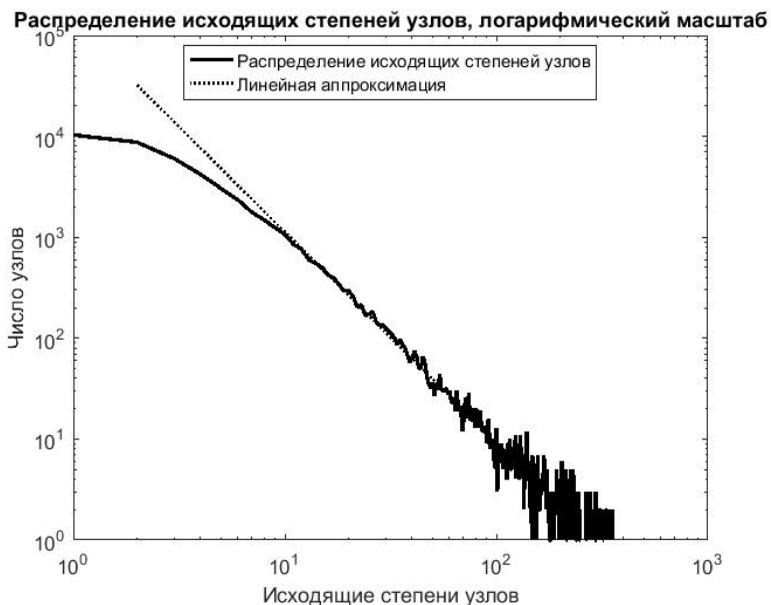


Рис. 2. Пример распределения исходящих степеней узлов

Число ответных связей составило от 142 735 до 145 099, в среднем 144 041, а число взаимных связей 286 084–290 832,

в среднем 288 586. Число узлов с ответными связями от 22 675 до 43 039, в среднем 30 861, а число узлов со взаимными связями 40 693–45 003, в среднем 42 565. Максимальная степень для ответных связей составила от 249 до 1975, в среднем 803, а для взаимных связей 578–2126, в среднем 1016. По этим показателям новая версия алгоритма существенно лучше предыдущей.

Коэффициент ассортативности находится в диапазоне от 0,12 до 0,24, в среднем 0,2. Это единственное выявленное ухудшение по сравнению с предыдущей версией алгоритма без механизма ответных связей. Этот коэффициент стал ниже, чем ожидаемый, а также существенно увеличился диапазон его разброса значений.

Средний коэффициент кластеризации составил 0,013. Средняя длина кратчайшего пути 4,4. Диаметр графа 11. Эти параметры рассчитывались для одного из образцов графов и показали существенное улучшение в сравнении с предыдущей версией алгоритма.

Коэффициенты вариации для показателей плотности графов, числа несвязных узлов, общее число разных видов связей составили менее 1 %, что соответствует очень малому разбросу значений. Коэффициент вариации для значений коэффициента ассортативности довольно высок, но не превысил критерий неоднородной совокупности данных – 22 %. Коэффициент вариации превышал 33 % (вплоть до 71 %) из рассмотренных показателей только для максимальной степени узлов по различным видам связей, что говорит о том, что данный показатель имеет большой диапазон разброса значений при одних и тех же начальных параметрах графа.

4. Выводы

В данной работе представлена новая версия алгоритма с отсевом активных узлов для ориентированных графов. По сравнению с предыдущей версией удалось добиться улучшения по большинству рассмотренных параметров. Выявлено ухудшение только для коэффициента ассортативности, у которого существенно увеличился диапазон разброса значений. Планируется дальнейшее исследование алгоритма.

Литература

1. ГИЛЯЗОВА А.А., ГУБАНОВ Д.А., ФЕДЯНИН Д.Н. *Характеристики больших графов, построенных по алгоритму с отсевом активных пользователей* // Тезисы 59-й науч. конф. МФТИ с междунар. участием; 21–26 ноября 2016 г. Москва-Долгопрудный-Жуковский. – М.: Изд-во МФТИ, 2016. – URL: http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/2841.pdf
2. РАЙГОРОДСКИЙ А.М. *Модели случайных графов*. – М.: МНЦМО, 2011. – 136 с. – URL: <http://www.mccme.ru/free-books/dubna/raigor-4.pdf>
3. BARABÁSI A. L., ALBERT R. *Emergence of Scaling in Random Networks* // Science. – 1999. – Vol. 286., 15 October 1999. – P. 509–512. – URL: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/9910332.pdf>.

MODELLING THE DIRECTED GRAPHS OF THE SOCIAL NETWORKS

Albina Giliazova, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, junior researcher (giliazova@mail.ru).

Abstract: This work presents a new version of the algorithm with the user deactivation for generating the random directed graphs with the statistical properties that are similar to the real-world online social networks. It was shown numerically that the mechanism of the user deactivation based on their responsive links improved the results when added to the algorithm. However, it was found that the range of variation of values of the assortativity coefficient had increased, so further research is needed.

Keywords: online social networks, directed graph, growth models, algorithm, user deactivation.

УДК 517.977
ББК 22.18

ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫЕ МОДЕЛИ ЗАКОНОТВОРЧЕСТВА В ЦИФРОВОМ ОБЩЕСТВЕ

Ерешко Ф.И.¹

(Вычислительный центр им. А.А. Дородницына
ФИЦ ИУ РАН, Москва)

Представлены модельные описания, которые демонстрируют возможности использования формальных подходов в законодательстве в рамках информационной теории иерархических систем, основывающейся на теории иерархических игр, и теории организационных систем.

Ключевые слова: теоретико-игровые модели, информационная теория иерархических систем, иерархические игры

1. Введение

В настоящее время можно говорить о тотальном наступлении этапа цифровизации общества, что является следствием глубокой миниатюризации производства и масштабным распространением мобильных устройств.

В книге-манифесте К. Шваба [8] говорится: «...Дизруптивные изменения, которые несет четвертая промышленная революция, переопределяют деятельность государственных учреждений и организаций. В частности, они вынуждают правительства (на региональном, национальном и местном уровнях) адаптироваться путем самоперестройки и находить новые варианты и способы сотрудничества... Первое, что приходит в голову при оценке воздействия четвертой промышленной революции на власть, – это то, что использование цифровых

¹ Феликс Иванович Ерешко, доктор технических наук (fereshko@yandex.ru).

технологий позволит лучше осуществлять управление. Более интенсивное и инновационное использование веб-технологий может помочь государственным администрациям модернизировать свои структуры и функции, чтобы улучшить общую результативность, начиная от укрепления процессов электронного управления до большей прозрачности, ответственности и вовлеченности в отношениях между правительством и его гражданами. Новые технологии и социальные группировки и взаимодействия, которые ими обеспечиваются, позволяют практически кому угодно оказывать влияние на ситуацию и при этом такими способами, о которых невозможно было бы подумать еще несколько лет назад....».

Далее развивается упомянутый тезис К. Шваба о том, что цифровые технологии позволят лучше осуществлять управление. Сосредоточим внимание на сфере законотворчества, теории права. Внедрение в эти области цифровых технологий естественно ожидать через построение математических моделей теоретико-игрового характера и через систему вычислительных экспериментов, реализуемых в имитационном режиме, т.е. теоретико-игровые модели составят каркас цифровых технологий, и послужат основой для разработки сценариев исследования поведения активных элементов в рамках принимаемых законоположений.

В работе рассматриваются технологии процесса законотворчества в экономической сфере. Базисное положение состоит в том, что активные экономические агенты преследуют цели, которые можно описать формально, и используют производственные технологии рационального ведения хозяйства.

И важным методологическим постулатом принимается, что используемые математические модели и выводы из вычислительных экспериментальных расчётов на их основе не являются основанием для буквального копирования и не могут быть механически перенесены в реальную практику. Они играют вспомогательную роль по той причине, что они опираются на модельные представления, которые по определению и по сути только отражают реальные процессы.

О роли качественных моделей принципиальную установку высказал Нобелевский комитет, подчеркнувший в пресс-релизе

по поводу присуждения Нобелевской премии в 2016 г. за достижения в теории контрактов, имеющих теоретико-игровую природу: «...в современной экономике содержится неисчислимое число контрактов. Новые теоретические инструменты, созданные Хартом (Hart) и Хольмстрёмом (Holmström), ценны для понимания реальных контрактов и институтов, а также для учёта возможных подводных камней в разработке контрактов. Их анализ оптимальных контрактов закладывает интеллектуальный фундамент для разработки стратегий и институтов во многих областях, от законодательства о банкротстве до политических конституций».

2. Математические модели *a posteriori* и *a priori*

Примем к рассмотрению положение, что существуют два этапа жизненного цикла закона: этап формирования **a priori** и этап исполнения **a posteriori**, т.е. после его разработки. Соответственно этому можно рассмотреть разные подходы к построению математических моделей на основе теории иерархических игр.

Ниже мы приведём описание и построение моделей для случая **a posteriori**, т.е. после его разработки.

Здесь рассмотрим схематично процедуру разработки закона в рамках теоретико-игровой постановки в условиях **a priori**.

Положим, что Центр (законодательный орган) формулирует проект закона (инициативу) в виде $\tilde{u}_i = u_i(x_i, \alpha_i, \beta)$, где α_i оценка центром неопределённых параметров, характерных для агента номера i , а β некий набор параметров проектируемого закона. В случае, если правило едино для всех, индекс в правой части i опускается.

Центр принимает для себя формальную зависимость f_0 для оценки эффективности разрабатываемого проекта закона на основе откликов агентов.

Этот проект направляется на рассмотрение всем агентам.

Центр, располагая некоторым представлением о возможных действиях агентов по выбору x_i , на этой основе рассчитывает

оптимальный отклик агента: $\tilde{x}_i = x_i(\tilde{u}_i = u_i(x_i, \alpha_i, \beta))$. В предыдущих записях эта процедура описывалась как решение оптимизационной задачи. Используя полученные выражения для $\tilde{x}_i = x_i(\tilde{u}_i = u_i(x_i, \alpha_i, \beta))$, Центр на основании зависимости f_0 оценивает эффективность избранного проекта. В случае необходимости Центр может изменить все параметры проекта: общую зависимость \tilde{u}_i , оценку параметров α_i , значения β .

Проиллюстрируем эту процедуру на выборе налоговой политики Центра.

Положим, что Центр стремится получить от группы из n хозяйствующих объектов набор продуктов x_i заданного комплекта (a_1, a_2, \dots, a_n) в максимальном количестве.

Тогда цель Центра запишется в виде $\max_{\tilde{u}_i \in U_i} \min_i(\tilde{x}_i / a_i)$, где $\tilde{u}_i = u_i(x_i)$ – налоговая политика Центра.

Целеустремлённые действия агентов запишем в виде максимизации прибыли $\max_{x_i \in X_i} [c_i x_i - u_i(x_i)]$, где c_i – рыночная оценка

продукции x_i , и производственные возможности описываются технологическим множеством $X_i = \{x_i / A_i x_i \leq b_i\}$, b_i – наличные ресурсы i -го агента.

Из решения этой задачи получаются значения \tilde{x}_i .

В случае имитационного эксперимента по реализации процедуры роль Центра по выбору \tilde{u}_i играют группы экспертов одного из комитетов законодательного органа, роль оценщика параметров α_i возлагается на эксперта от исполнителя налоговых функций, роль оценщика параметров β на группу экспертов социальных служб, роль оценщика отклика системы агентов

$\tilde{x}_i = x_i(\tilde{u}_i = u_i(x_i, \alpha_i, \beta))$ должны исполнять независимые эксперты, специалисты в макроэкономике. У каждого ролевого игрока могут быть свои модели формирования указанных переменных.

3. Иерархические системы

Принимаем здесь ту же схему взаимоотношений в обществе, описанную выше, где Центр (законодательный орган) и члены общества образуют веерную иерархию, при этом Центр по сути своего предназначения делает первый ход. Как в шахматах, первый ход всегда делает игрок с белыми фигурами. Предполагаем, естественно, что члены общества (активные элементы) имеют свои интересы и возможности вырабатывать (и действовать в соответствии со своими интересами) стратегии в рамках законов, которые вырабатывает Центр. Заметим, что возможен и случай, когда Центр может исполнять технические функции, исполняя волю сообщества активных элементов.

Для целей согласованного принятия решений Центром и подчиненными системами разработан аппарат теории иерархических игр [3–6], теории активных систем и организационных систем [9–11].

В рамках этих теорий в качестве основных характеристик иерархических систем рассматриваются следующие: а) наличие выделенного участника (Центра) системы, обладающего правом первому выбирать стратегию в зависимости от имеющейся или предполагаемой информации о действиях подчиненных звеньев управления и сообщать ее нижнему уровню, б) Центр осуществляет свой выбор, опираясь на принцип наибольшего гарантированного результата. Ставится задача об отыскании наилучшего поведения центра с учетом активного поведения подчиненных систем, стремящихся к достижению собственных целей, действуя в рамках правил, устанавливаемых центром.

Положим, что Центр стремится к достижению наибольшего значения критерия эффективности $f_0(x, u)$, где выбор Центра $u \in U$, $u = (u_1, \dots, u_n)$, $u_i \in U_i$, $U = U_1 \times \dots \times U_n$.

Подсистемы нижнего уровня иерархии стремятся к увеличению критериев эффективности $f_i(x_i, u_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, и выборы подсистем: $x_i \in X_i$. Суммарный выбор подсистем: $x = (x_1, \dots, x_n)$, $x \in X$, $x = (x_1, \dots, x_n)$, $x_i \in X_i$, $X = X_1 \times \dots \times X_n$.

В теории рассматривается несколько ситуаций организационной активности и информированности центра и подсистем. Приведём для автономности изложения описание механизмов.

Механизмы 1-го типа (прямые). Центр не рассчитывает на информацию о выборах подсистем или не имеет возможности ее обработать. Тогда его механизм управления состоит в назначении конкретных значений $u \in U$ и сообщении их подсистемам. Такими механизмами управления прямого типа являются: назначение плановых заданий, распределение ресурсов, назначение цен, квот и других ограничений на производство.

Механизмы 2-го типа (с обратной связью). Центр рассчитывает на информацию о выборах подсистем в момент выбора собственной стратегии и формулирует механизм как функции $\tilde{y}_i = u_i(x_i)$. Такими механизмами являются: тарифные сетки, правила поощрений и штрафных санкций, налоговая политика, механизмы стимулирования. Во многих случаях оптимальный механизм 2-го типа имеет разрывный характер:

$$u_i(x_i) = \begin{cases} u_i^\varepsilon, & x_i = x_i^\varepsilon, \\ u_i(x_i), & x_i \neq x_i^\varepsilon, \end{cases}$$

где $u_i(x_i)$ определяется из условия минимизации критерия i -й подсистемы $\min_{u_i \in U_i} f_i(x_i, u_i)$ и является, по сути, «наказывающей»

ветвью механизма. Эта особенность механизма 2-го типа (наличие ветвей поощрения и угрозы наказания) будет затем широко использоваться при конструировании моделей с иерархической структурой.

Механизмы 3-го типа (с двойной обратной связью). Центр рассчитывает на информацию о функции $\tilde{x}_i = x_i(u_i)$. Механизм управления центра – функционал $\tilde{y}_i = u_i(\tilde{x}_i)$. Если $x_i(u_i)$ – производственная функция подсистемы, связывающая выпуск продукции с выделенным ресурсом u_i , выбором которой распоряжается подсистема, то механизм управления – это правило выделения конкретного объема ресурса u_i в зависимости от способа его использования. Такими механизмами являются: субсидии под согласованные планы, кредиты под определённые проекты, опционные контракты.

В работах школы Ю.Б. Гермейера [3] отмечено, что с точки зрения результата центра все многообразие механизмов (в смысле глубины рекурсии при их определении) исчерпывается тремя перечисленными, и Центру во всех случаях, когда это возможно, следует стремиться к реализации механизма с обратной связью как наиболее выгодному.

4. Примеры структур правового инструмента

Изложение содержания законов привлекательно удобно для формализации процессов законотворчества на языке теории игр.

Первый пример приведём на основе описания Федерального закона Российской Федерации от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ «О промышленной политике в Российской Федерации», который носит фундаментальный характер. Он направлен на законодательное закрепление ключевых инструментов промышленной политики, заложенных в принятых ранее программных документах, систематизирует принципы государственной поддержки промышленности, меры стимулирования промышленной деятельности, определяет полномочия государственных органов при реализации ими промышленной политики.

Предметом его регулирования выступают общественные отношения, возникающие между органами государственной власти и субъектами промышленного сектора экономики при осуществлении различных инструментов государственного воздействия на деятельность компаний. В качестве инструментов государственного воздействия на субъекты промышленной деятельности могут быть как меры экономического стимулирования, так и меры государственного регулирования (императивные предписания и запреты). При этом государство может воздействовать на промышленную деятельность как непосредственно через государственные органы, так и опосредованно через организации инфраструктуры поддержки промышленной деятельности.

Меры стимулирования промышленной деятельности представляют собой различные инструменты стимулирования. В законе прописаны особенности применения мер финансовой поддержки через фонды развития отраслей промышленности,

поддержки в области научно-технической и инновационной деятельности, информационной и консультационной поддержки, поддержки в области развития кадрового потенциала. При этом определен открытый перечень мер стимулирования промышленной деятельности, который при необходимости может быть расширен или дополнен.

Все указанные атрибуты для теории принятия решений суть содержательная постановка задачи управления, и следующий анализ состоит в записи на формальном языке описанной обстановки операции в виде системы математических моделей.

Приведём одно из схематичных описаний для иллюстрации возможной схемы выбора стимулирующей политики.

Следуя описанию выше, подсистемы Π_i стремятся к увеличению критериев эффективности $f_i(x_i, u_i)$, $i=1, 2, \dots, n$, и выборы подсистем: $x_i \in X_i$. Как видно из этого описания, каждая из подсистем Π_i при принятии решения $x_i \in X_i$ должна принимать во внимание наличие неопределённого фактора $u_i \in U_i$ и принимать гипотезу относительно конкретных величин этих внешних для неё факторов.

Если подсистемы не имеют иных возможностей, кроме как те, что описаны в этой модели (считаем, что модель адекватно описывает ситуацию), то естественно для подсистем принять гипотезу наихудшей возможной реализации неконтролируемых параметров и соответственно для выбора наилучшего поведения принять принцип наибольшего гарантированного результата.

Тогда их выборы определяются из решения задач $L_i = \max_{x_i \in X_i} \min_{u_i \in U_i} f_i(x_i, u_i)$, что предполагает получение для подсистемы Π_i наихудшего значения параметра $u_i^h \in U_i$.

Как правило, в реальности роль параметров $u_i \in U_i$ играют наличные ресурсы, и функции выигрыша подсистем строго монотонны относительно этих параметров и строго монотонно возрастают при их возрастании. Так что наличие Центра, распределяющего дефицитные ресурсы, окажется выгодным для всех подсистем.

Выбор промышленной политики и, в частности, мер стимулирования может быть сформулирован в форме разрешения соответствующих оптимизационных задач в рамках описанных выше механизмов и теоретико-игровых моделей.

Определим наиболее выгодную для Центра точку $u_i^0 \in U_i, x_i^0 \in X_i$ из решения задачи $\sup_{(x_i, u_i) \in D_i} f_0(x, u)$, где

$$D_i = \left\{ x_i \in X_i, u_i \in U_i \mid f_i(x_i, u_i) > L_i = \max_{x_i \in X_i} \min_{u_i \in U_i} f_i(x_i, u_i) \right\} \quad - \quad \text{это}$$

множество выгодных выборов для подсистем.

И тогда оптимальные политики стимулирования будут

иметь вид $u_i(x_i) = \begin{cases} u_i^0, & x_i = x_i^0 \\ u_i''(x_i), & x_i \neq x_i^0 \end{cases}$, т.е. или выполнение зада-

ний, или наказание.

Особенность оптимальной стратегии в механизмах 2-го рода: две ветви, одна из них ветвь наказания за отступление от предложения очень созвучна исходным конструкциям правовых норм.

Второй пример связан с Федеральным законом от 13 июля 2015 г. № 224-ФЗ «О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»). В Законе устанавливается, что государственно-частное партнерство, муниципально-частное партнерство – юридически оформленное на определенный срок и основанное на объединении ресурсов, распределении рисков сотрудничество публичного партнера (РФ), с одной стороны, и частного партнера, с другой стороны, которое осуществляется на основании соглашения о государственно-частном партнерстве, соглашения о муниципально-частном партнерстве, заключенных в соответствии с настоящим Федеральным законом в целях привлечения в экономику частных инвестиций, обеспечения органами государственной власти и органами местного самоуправления доступности товаров, работ, услуг и повышения их качества.

Моделирование организационных систем в рамках Закона о ГЧП описано в работах. Приведём одну из формулировок.

До трансформации производства имеет записи:

Производство 1 Лидер ГП Производство 2 Ведомое ЧП

$$(c_1, x_1) \rightarrow \max$$

$$(c_2, x_2) \rightarrow \max$$

$$A_1 x_1 \leq b_1$$

$$A_2 x_2 \leq b_2$$

$$f_1^{opt} = \max_{x_1 \in X_1} (c_1, x_1)$$

$$f_2^{opt} = \max_{x_2 \in X_2} (c_2, x_2)$$

$$X_1 = \{x_1 \in E_{n_1}^+ \mid A_1 x_1 \leq b_1, \}$$

$$X_2 = \{x_2 \in E_{n_2}^+ \mid A_2 x_2 \leq b_2, \}$$

Для диверсифицированной модели ГП [12] имеем:

– объединение ресурсов:

$$X_{div} = \{x_1 \in E_{n_1}^+, x_2 \in E_{n_2}^+ \mid A_1 x_1 + A_2 x_2 \leq b_1 + b_2, \}$$

– и суммирование критериев, так что

$$F^{opt} = \max_{(x_1, x_2) \in X_{div}} [(c_1, x_1) + (c_2, x_2)].$$

Рассматривая вопрос о рациональности вхождения в коалицию (присоединения, приобретения, поглощения) с ЧП, планирующие органы ГП определяют соответствующие достаточные условия оптимальности организационных мероприятий.

5. Заключение

Представленные модельные описания демонстрируют возможности использования формальных подходов в законотворчестве в рамках информационной теории иерархических систем, основывающейся на теории иерархических игр, и теории организационных систем [1–9].

Литература

1. ШВАБ К. *Четвертая промышленная революция* / пер. с англ., предисл. Г.О. Грефа. – М.: Эксмо, 2016. – С. 138.
2. МОИСЕЕВ Н.Н. *Информационная теория иерархических систем* // Труды I Всесоюзн. конф. по исследованию операций. – Минск, 1974. – С. 95–99.
3. ГЕРМЕЙЕР Ю.Б. *Игры с противоположными интересами*. – М.: Наука, 1976. – 328 с.
4. ВАТЕЛЬ И.А., ЕРЕШКО Ф.И. *Математика конфликта и сотрудничества*. – М.: Знание, 1973. – 64 с.

5. ВАТЕЛЬ И.А., ЕРЕШКО Ф.И., КОНОНЕНКО А.Ф. *Игры с фиксированной последовательностью ходов и иерархические системы управления в экономике* // Методы оптимизации и их приложения. – Иркутск, 1974. – С. 86–99.
6. ВАТЕЛЬ И.А., ЕРЕШКО Ф.И. *Игры с иерархической структурой* // Математическая энциклопедия. Т. 2. – М., 1979. – С. 478–482.
7. БУРКОВ В.Н. *Основы математической теории активных систем.* – М.: Наука, 1977. – 255 с.
8. *Механизмы управления: учеб. пособие* / под ред. Д.А. Новикова. М.: ЛЕЛАНД, 2011. – 192 с. (Умное управление).
9. НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами: учеб. пособие.* – М.: МПСИ, 2005. – 584 с.
10. ВАРНАВСКИЙ В.Г., ЦВИРКУН А.Д. *Управление крупными инфраструктурными системами на основе концессий и проектного финансирования* // Управление развитием крупномасштабных систем (Современные проблемы. Вып. 2): моногр. / под ред. А.Д. Цwirкуна. – М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2015. – 473 с. – С. 95–115.
11. ЕРЕШКО Ф.И., ТУРКО Н.И. *Процедуры организации государственно-частного партнёрства в отраслях промышленности* // Бизнес в законе. Экономико-юридический журнал. – 2016. – № 6. – С. 49–56.
12. ЕРЕШКО Ф.И. *Теория иерархических игр в приложении к законотворчеству в цифровом обществе* // Бизнес в законе. Журнал Computational nanotechnology. – 2017. – № 2. – С. 52–58.

GAME-THEORETIC MODELS OF LAWMAKING IN A DIGITAL SOCIETY

Feliks Ereshko, Dorodnitsyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Doctor of Science (fereshko@yandex.ru).

Abstract: Model descriptions are presented that demonstrate the possibilities of using formal approaches in lawmaking in the framework of the information theory of hierarchical systems based on the theory of hierarchical games and the theory of organizational systems.

Keywords: theoretic-game models, information theory of hierarchical systems, hierarchical games.

УДК 331.108.2
ББК 08.05.00

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПОДГОТОВКИ ИТ-СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ ФИНАНСОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ В РОССИИ

Яковлев В.И.¹

*(Московский физико-технический институт,
Москва)*

В данной статье рассмотрены проблемы подготовки специалистов в условиях цифровой экономики Российской Федерации для отрасли финансовых технологий. При выявлении проблем проанализированы данные по количеству студентов в определённых городах в сфере информационных технологий. Приведены практические меры для решения проблем подготовки ИТ-специалистов.

Ключевые слова: цифровое образование, ИТ-специалист, подготовка кадров, цифровая экономика, финансовые технологии, ИТ-отрасль.

1. Введение

Сегодня, как никогда ранее, становится очевидным, что роль информационных технологий в нашем обществе занимает все более важное место. Начавшийся промышленный рост вернул былую актуальность информационных систем управления предприятиями, все более значимое место занимают средства массовой информации на основе интернет-технологий, развивается интернет-индустрия, значимым сектором экономики России становится оффшорное программирование. Движу-

¹ Владислав Игоревич Яковлев, аспирант, заместитель заведующего кафедрой «Банковские информационные технологии, МФТИ, г. Москва (cinetapnews@mail.ru).

щей силой этих процессов являются специалисты в области информационных технологий. Россия, несмотря на изоляцию нашей IT-индустрии времен застоя и вопреки нищенскому финансированию высшей школы в ходе перестройки, по-прежнему является одним из значимых в мире поставщиков высококлассных IT-специалистов.

Особо следует сказать о системе электронного документооборота. Её внедрение позволило поднять работу финансовых органов и администраторов доходов бюджета по документообороту на более высокий уровень, а её использование обеспечило, прежде всего, сокращение сроков обработки огромного количества документов. Для контроля в платежной системе внесен Закон от 27.06.2011 161-ФЗ «О национальной платежной системе», его действие направлено на совершенствование расчетных операций по Российской Федерации [2]. В настоящее время проводятся мероприятия, способствующие обеспечению внедрения автоматизированной системы учета начислений и фактов уплаты физическими и юридическими лицами государственных пошлин, денежных платежей и сборов в рамках реализации Закона от 27.07.2010 210-ФЗ «Об организации предоставления государственных и муниципальных услуг» [3].

2. Состояние отрасли финансовых технологий и цифровой экономики в России

В Российской Федерации сфера финансовых технологий во многом следует мировым тенденциям: возникают новые рынки, технологические процессы, фирмы. Характерной чертой российской отрасли финансовых технологий считается то, что ведущие банки и экономические компании нередко реализуют интересные решения и сами модернизируют классические экономические услуги. В то же время возникает большое количество новейших высокотехнологичных фирм, а совместно с ними и новые технологии, что содействует повышению конкуренции в данной отрасли. Формирование рынка немислимо представить без внедрения и развития финансовых технологий. Банки и финансовые компании становятся более технологичными, вследствие чего у них по-

является возможность предоставлять более надежные, безопасные и высококачественные услуги населению, в связи с чем цифровые экономические технологии в РФ продолжают свое формирование. Под отраслью финансовых технологий («финтех»), как правило, понимают, использование новаторских технологий с целью предложения финансовых услуг. При этом в связи с относительной молодостью сферы, а также многообразием технологий, используемых в финансовой области, пределы сферы финансовых технологий размыты. К примеру, зачастую под сектором экономики финансовых технологий подразумевается комплекс молодых компаний (стартапов), которые противопоставляются традиционным экономическим учреждениям. С другой стороны, традиционные банки, страховые и управляющие компании стремительно вводят новые технологии и с данной точки зрения также считаются участниками рынка финтеха. Помимо этого имеется несколько фирм, которые оказывают свои услуги по предоставлению собственных технологий (обработка «больших данных», блокчейн и т.д.). Данные фирмы также можно считать значимыми участниками рынка. В феврале 2016 г. Центральным банком РФ была сформирована рабочая группа по анализу многообещающих технологий и инноваций на финансовом рынке, основной задачей которой считается исследование распределенных технологий и разработок в мобильной, платежной и иных областях. В апреле 2016 г. в структуре Центрального банка России основано новое подразделение – Департамент финансовых технологий, проектов и организации процессов. На Департамент также возложены функции по мониторингу, рассмотрению и оценке вероятного применения перспективных технологий и инноваций в будущем на финансовом рынке. С 2015 г. в рамках проекта «Национальная технологическая инициатива» основан план по формированию финтех-технологий «Финнет». В октябре 2016 г. Банк России запустил проект «Мастерчейн». Эта площадка дает возможность участникам финансового рынка делиться важной информацией. Позже на базе данной платформы можно будет создавать разнообразные новые сервисы и услуги. На сегодняшний день Россия находится в ранней стадии развития финансовых технологий. Важно отметить, что, несмотря на до-

минирование традиционных финансовых компаний, в России появляются всё новые компании, которые реализуют проекты в сфере финтех.

2.1. ЗНАЧЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

В последнее время современные технологические процессы достаточно стремительными темпами проникают в большинство разделов финансовой сферы. Электронную либо цифровую экономику можно назвать экономической деятельностью, которая базируется на цифровых технологиях. Другими словами, название включает в себя не только исследование и торговлю программным обеспечением, но и электронные товары, и сервисы, изготавливающие электронную коммерцию. Расчёт за обслуживание довольно-таки часто происходит электронными деньгами. Главными элементами цифровой экономики называют электронную коммерцию, электронные платежи, интернет-рекламу и игры. Во многих государствах на сегодняшний день такой вид цифровой экономики, как электронная торговая деятельность, более проработана, если судить по ценовому показателю оборотов. Она определяет дистанционную куплю-продажу товаров с использованием Интернета, образцы, заказ услуг и продуктов с помощью интернет-магазинов.

Россия – одно из крупнейших в Европе государств по количеству интернет-пользователей. Часть электронной экономики Российской Федерации составляет 2,1 % от общего объема ВВП, что в 1,3 раза больше, чем было 5 лет назад. По состоянию на 1-е полугодие 2016 г. операции с применением электронных денег составляют 7 %, что отвечает показателю 2015 г. и указывает на стабильное число такого типа операций в общей структуре произведенных платежей и переводов. Тенденция повышения количества операций по платежам и переводам с применением банковских карт сохраняется уже несколько последних лет (среднегодовое увеличение числа безналичных операций за промежутки с 2010 по 2015 г. – 55 %).

Количество операций с электронными деньгами также устойчиво повышается год от года, хотя и не такими внушительными темпами. Увеличение числа операций с электронными

деньгами в 2015 г. в сопоставлении с 2014 г. составило 8 %, в то время как увеличение числа операций с банковскими картами за тот же промежуток составило 47 %.

3. Подготовка специалистов ИТ-сферы

Для решения проблем в сфере научно-технических инноваций и импортозамещения в Российской Федерации уже в ближайшие годы понадобятся, по оценке Министерства связи и массовых коммуникаций РФ, не меньше 350 тыс. грамотных экспертов в области информационных технологий (ИТ). И сфера деятельности данных ИТ-экспертов достаточно обширная, но на 2016 г. преобладает специальность разработчика программного обеспечения и системного администратора (рис. 1), что в некотором роде монополизировало деятельность в информационной области. Однако получение отечественными предприятиями и ИТ-фирмами этих профессионалов в ближайшее время является довольно-таки проблематичным. Проблема не только в демографических вопросах, но и в организации деятельности по профессиональной ориентации школьников, в обеспечении качества преподавания в институтах, в способностях развития и карьерного роста юных специалистов и иных факторах. Разумеется, что данная цель потребует комплексного подхода – регулировать её необходимо общими стараниями всех университетов без исключения, ИТ-фирм и бизнес-заказчиков, при прямом участии муниципальных ведомств.

Сфера деятельности	Доля вакансий
Разработка ПО	47 %
Техническая поддержка, администрирование	21 %
Информационные системы	7 %
Интернет	6 %
Аналитика	5 %
Другие сферы	14 %

*Рис. 1. Актуальные сферы деятельности на январь 2016 г.
(данные получены с рекрутингового портала Superjob.ru)*

Что касается ИТ-индустрии, в данном случае она мгновенно выстроилась на базе новейшей методологии. Её ключевые образующие – компьютеры, оперативные системы, программы, ресурсы хранения и передачи данных – многофункциональны, поэтому они равны в абсолютно всех государствах и сферах экономики. Именно это позволило достигнуть высокой горизонтальной специализации. К примеру, в Microsoft имеются просто разработчики программного обеспечения. Очевидно, каждая фирма характеризуется чем-то индивидуальным, однако это не столь внушительно, так что фирмы стремительно осваиваются при смене места деятельности. Администратор баз данных не испытывает перемен в специфике работы при переходе, в частности, с кондитерского производства на машиностроительное предприятие.

На сегодняшний день российская организация подготовки специалистов для ИТ-индустрии абсолютно не соответствует запросам отрасли. В крупном объеме (не меньше 50 %) студенту продолжают давать не всегда актуальные, а также не фундаментальные и очень стремительно устаревающие научно-технические знания. И в то же время недостаточно вырабатывают требуемые практические навыки. Подготавливают научных работников-исследователей либо хакеров-одиночек, однако не инженеров программного обеспечения. Необходимо менять ценности в образовательных программах. Ведь если менять какую-то систему, то на выходе необходимо сделать её жизнеспособной. Сначала нужно осознать, под воздействием каких соображений в Министерстве образования и науки образуются квалификационные требования к специалисту, бакалавру, магистру, что попадает в программы, какие технологии преподавания применяются, какой материальной основой обладают университеты. В настоящее время, к сожалению, квалификационные условия создаются на основе устарелых определений и подходов, они на 80 % не отвечают нынешним условиям индустрии.

Важной задачей считается создание инфраструктуры системы переподготовки и повышения квалификации ИТ-специалистов. Специалист по программированию обязан регулярно увеличивать собственную квалификацию, в ином случае он по-

просту отстает от стремительно развивающейся дисциплины и теряет конкурентоспособность на рынке труда. Общепризнанной в текущий период технологией преподавания работающих разработчиков программного обеспечения «почти» без отрыва от производства считается освоение интенсивных (3–5 суток) курсов фирм-производителей определенных решений и технологий (например, Sun Microsystems либо Cisco Systems) в сертифицированных тренировочных центрах. Направления поставляются в виде студенческих наборов (китов), в состав которых помещаются программные продукты, учебники, подготовленные лабораторные работы. Развитие направлений выполняется в то же время с выпуском новых программных продуктов. Обучение может быть как по отдельным курсам, так и согласно единым программам подготовки сертифицированных специалистов, которые содержат в себе ряд направлений. Подготовка заканчивается сдачей теста и получением сертификата.

Неоспоримыми плюсами такой схемы переподготовки являются адекватность исследуемых тем современному состоянию и степени формирования информационных систем и технологий, углубленность и правильность предлагаемого тренировочного материала. Сжатость преподавания по времени и возможность подбора тем, соответствующих текущим задачам компании, дают возможность создать эластичную систему переподготовки сотрудников. Получаемые работниками сертификаты международного стандарта увеличивают конкурентоспособность компании на рынке.

К сожалению, данная технология обладает и рядом недостатков: высокая стоимость, недостаток программ, интегрирующих либо сравнивающих возможности технологий разных компаний, небольшая популярность тренировочных центров в регионах, увеличение мобильности работников (приобретение сертификатов повышает их возможности на западном рынке труда). По этой причине поствузовская подготовка нередко отсутствует во многих софтверных фирмах либо в лучшем случае интегрирована в сам ход постановки производственных проблем. При этом функции наставника, по сути, возлагают на руководителя проекта, распределяющего задачи среди подчиненных, и, воз-

можно, заинтересованного в более четко определенном минимальном превышении уровня компетентности каждого. Все без исключения приведенные операции обладают единой основой – они требуют качественно нового уровня взаимодействия образовательного сообщества и бизнеса. Отталкиваясь от решений специалистов, можно отметить 3 главные трудности нынешней системы высшего профессионального образования:

1. Невысокая, неконкурентоспособная согласно сопоставлению с ИТ-фирмами заработная плата педагогов, результатом чего считается недостаток в высших учебных заведениях юных экспертов и педагогов-практиков;

2. Недостаточность практико-ориентированных тренировочных программ, что обуславливается рядом факторов;

3. Специфические свойства нынешнего поколения учеников. Абитуриенты не владеют необходимыми базовыми познаниями по точным дисциплинам для обучения по ИТ-специальностям (из-за всеобщего падения качества школьного образования), нередко не коммуникабельны, не способны к самообразованию и самоорганизации. Таким образом, руководство страны ставит амбициозные задачи по формированию ИТ-сферы, которая в перспективе ближайшего десятилетия должна увеличиваться темпами, опережающими среднемировую темп роста ИТ-сферы. Это необходимо для того, чтобы отрасль стала драйвером экономики, а не ее ограничивающим условием. В данной взаимосвязи немаловажно сформировать такие требования для развития профессионального потенциала, которые бы гарантировали удовлетворение не только нынешнего, но и перспективного спроса на ИТ-специалистов во всех секторах экономики. Итоги проделанного изучения четко выявили то, что прогнозный спрос в 350 тыс. новых высококвалифицированных экспертов к 2020 г. сейчас недостижим. Специалисты установили потребность улучшения системы подготовки ИТ-сотрудников. Более этого, с целью повышения числа заинтересованных в специальности абитуриентов, по мнению социологов, уместно ввести в школах агитационные мероприятия и минимальную профориентацию.

В конечном итоге, необходимо выделить достаточное число выпускаемых специалистов. Высшая школа не гарантирует потребности ИТ-индустрии в высококлассных кадрах в сфере информативных технологий и в особенности в программистах. В течение последних лет в Российской Федерации наблюдалось довольно устойчивое увеличение рынка труда для разработчиков программного обеспечения, достигавшего в отдельные годы порядка 30–35 % в год. В то же время вместе с этим до недавнего времени число экспертов уменьшилось. В целом приблизительно 250 (примерно 1/4 доля) российских высших учебных учреждений готовят специалистов в сфере информационных технологий, при этом общее количество учащихся в подобных профессиях не превосходит 100 тыс. человек (из более чем 3,5 млн студентов, в том числе заочников, т.е. приблизительно 3 % абсолютно всех учащихся).

В последние годы выпуск составляет меньше 10 тыс. человек с тенденцией к увеличению до 20–22 тыс. в год за счет повышения приема на эти специальности, которое произошло 3–4 года назад. Весьма любопытно количественное разделение по университетам студентов, проходящих подготовку в сфере информационных технологий. На рис. 2 приведено общее число учащихся всех годов преподавания в 12 отечественных институтах, которые готовят наибольшее число ИТ-сотрудников.

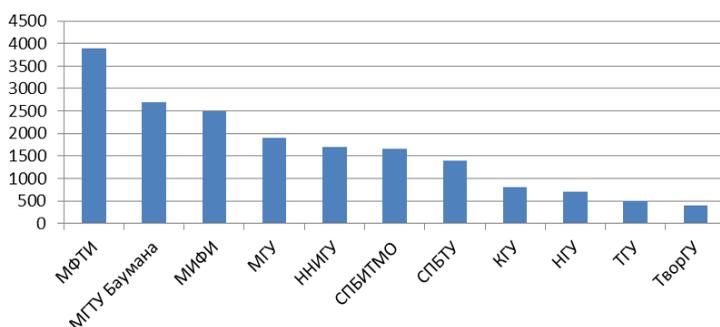


Рис. 2. Общее количество студентов, проходящих обучение в области информационных технологий («информационные технологии в высшей школе» – выпуск 20)

Довольно равномерная картина (где резко выделяется по собственным показателям только Московский физико-технический институт) становится совершенно другой, если просуммировать число учащихся по населенным пунктам. Возможно легко заметить, что заметное количество учащихся обучается только в Москве и Санкт-Петербурге.

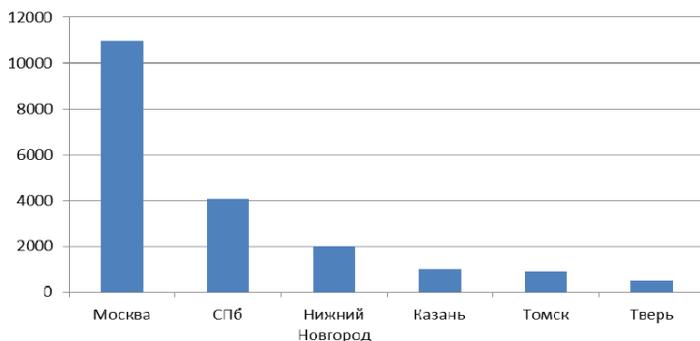


Рис. 3. Количество студентов, проходящих обучение в области информационных технологий, по городам («информационные технологии в высшей школе» – выпуск 20)

Основные проблемы при подготовке ИТ-сотрудников согласно данной статье следующие:

- ◆ Недостаточность знаний о работе в ИТ: 87 % будущих студентов стремится в ИТ не в связи с заинтересованностью, а в расчете на гарантированное устройство на работу.

- ◆ Неактуальность преподаваемых в институте знаний: достаточностью знаний для работы могут похвастаться 13 % всех выпускников, другим же требуется доучиваться в процессе работы.

- ◆ Несоответствие надежд юного специалиста и его будущего работодателя.

4. Заключение

Будущее мирового финансового рынка невозможно представить без внедрения и развития новаторских технологий, новых продуктовых и сервисных идей. Крупные банки и неболь-

шие компании становятся более технологичными, вследствие чего у них возникает возможность предоставлять более безопасные и экономные услуги. В свою очередь, люди становятся более мобильными и самостоятельными, им необходимы новейшие приборы для осуществления собственных целей, ещё более комфортные, высококачественные и выгодные, и потому за пределами любых сомнений финансовые технологии непременно продолжат развиваться в Российской Федерации.

Это, в 1-ю очередь, перевод и продвижение учебных курсов и методических пособий известных иностранных университетов, с предельно возможной унификацией тренировочных проектов с международными стандартами. Изменение и стандартизация специальностей, а также внедрение новейших профессий, соответствующих потребностям ИТ-индустрии (в первую очередь, в сфере программирования и управления информационными технологиями).

Во 2-ю очередь, формирование и обширное применение института приглашенных профессоров, включая как основных иностранных ученых, так и отечественных. Следует налаживать бартер педагогами с основными зарубежными институтами, поддерживать участие педагогов высшей школы в трудах международных конференций, международных комитетов по вопросам образования и стандартизации.

В 3-ю очередь, помощь в осуществлении возможности обмена студентами и их обучения за границей. Оказание поддержки учащимся провинциальных высших учебных учреждений, благодаря которой они могут закончить образование в наилучших учебных заведениях государства, в особенности на этапах магистратуры и аспирантуры.

И, в конечном итоге, в 4-ю очередь, создание образцовых центров программирования и информационных технологий на основе нескольких наилучших кафедр и факультетов. Безусловно, их следует создавать при тех университетах, в которых существуют сильные математические школы и школы в сфере программирования (всего менее десятка российских университетов).

Литература

1. БАРИНОВ В.А., ЖМУРОВ Д.А. *Развитие сетевых формирований в инновационной экономике* // Менеджмент в России и за рубежом. – 2007. – № 1.
2. О национальной платежной системе. *Федеральный закон от 27.06.2011 161-ФЗ* [Электронный ресурс] // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс. – URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 24.05.2017).
3. *Об организации предоставления государственных и муниципальных услуг: Федеральный закон от 27.07.2010 210-ФЗ* [Электронный ресурс] // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс. – URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 24.05.2017).
4. *Рекомендации по преподаванию программной инженерии и информатики в университетах* / под ред. В.Л. Павлова. – М.: ИНТУИТ.РУ «Интернет-университет информационных технологий», 2007. – 462 с.
5. УРАЗАЕВА Л.Ю., ДАЦУН Н.Н. *Потребности рынка труда и особенности отношения студентов различных направлений подготовки к обучению* // Проблемы экономики. – 2013. – № 3(55). – С. 43–46.
6. СТРЕЛЬЦОВ М. *О сущности и предмете сетевой экономики* // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2009. – № 3.
7. *Статистика в области информационных технологий* [Электронный ресурс] // Рекрутский портал «Суперджоб»: сайт. – URL: <http://WWW.SUPERJOB.RU> (дата обращения: 24.05.2017).
8. *Исследование «Россия онлайн: Влияние Интернета на российскую экономику»* [Электронный ресурс] // The Boston Consulting Group (BCG) – 2011: сайт. – URL: <http://gtmarket.ru/news/state/2011/05/20/2921> (дата обращения: 24.05.2017).

НАЗВАНИЕ

Vlad Yakovlev, Moscow, Federal Research Center for Informatics and Management (cinemanews@mail.ru).

Abstract: This article examines several aspects of the educational problems for IT specialists of the Russian Federation for the financial technology industry. When problems are identified, data on the number of students in certain cities in the field of information technology are analyzed. The analysis of statistics on the relevance of specialties in the information field is made. Particular attention is paid to the practical part of the problem analysis. The article gives tables, as well as charts for better understanding of the topic of this text. Practical measures are given to solve the problems of training IT professionals.

Keywords: IT specialist, training, digital economy, financial technology, IT industry.

УДК 519.876.2
ББК 22.18

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ИТ-СЕРВИСА В РЕЗУЛЬТАТЕ ИХ СТРАХОВАНИЯ И ПЕРЕДАЧИ НА АУТСОРСИНГ

Маслова Е.В.¹

*(Сибирский государственный индустриальный
университет, Новокузнецк)*

В статье предлагается применять аутсорсинг как защитную меру в случае высокой вероятности реализации рисков ИТ-сервисов. Рассчитывается экономическая эффективность от внедрения ИТ-аутсорсинга на малом предприятии, которая доказывает целесообразность его внедрения. Также дается постановка задачи разработки системы страхования от рисков и приводятся условия, при которых выгодно использовать эту защитную меру.

Ключевые слова: ИТ-сервис, ИТ-аутсорсинг, страхование.

В последнее время все чаще говорят о новой концепции управления ИТ-подразделениями – ITSM (IT Service Management, управление ИТ-услугами). Суть ее состоит в концентрации на клиенте и его потребностях в бизнесе, а не на технологиях. В первую очередь ИТ-провайдер, т.е. поставщик ИТ-услуг, должен сосредоточиться на качестве ИТ-сервисов, которые они предоставляют своим заказчикам.

ИТ-сервис – комплекс взаимодействующих ИТ-активов (сервисных активов), цель которого состоит в производстве ценности для потребителя [2]. При этом любой ИТ-сервис обладает следующими характеристиками: доступность, мощность, непрерывность, безопасность. В ходе повсеместного внедрения информационных технологий во все сферы человеческой жизни актуальной проблемой становится обеспечение информационной безопасности, а значит, такая характеристика ИТ-сервиса,

¹ Елена Владимировна Маслова, аспирант (elenamaslova1805@yandex.ru).

как безопасность, является одной из ключевых. Следовательно, разработке мер по защите ИТ-сервиса от различных рисков ИТ-провайдеру стоит уделить больше внимания.

Поскольку мы говорим об ИТ-сервисе, то и риски, с ними связанные, относятся к информационным. Информационный риск – это опасность возникновения убытков или ущерба в результате применения в организации информационных технологий, т.е. информационные риски связаны с созданием, хранением, передачей и обработкой информации.

Анализ эксплуатации ИТ-сервиса на крупном предприятии показал, что риски, возникающие часто и требующие для их устранения больших временных затрат (около часа и более), целесообразно передать на аутсорсинг компании, специализирующейся на этом. Такие компании называют аутсорсинговыми или аутсорсерами. К главным преимуществам аутсорсинга относятся: снижение затрат, сокращение численности персонала, возможность концентрации на основной деятельности, получение услуг более высокого качества, деление ответственности.

Но прежде чем выбирать партнера-аутсорсера и заключать с ним договор на обслуживание, важно адекватно оценить свои финансовые ресурсы и возможности. Ниже на примере передачи части рисков малой организацией компании-аутсорсеру ООО «Синерго Софт Системс», расположенной в г. Новокузнецке, показано, что внедрение аутсорсинга в бизнес-деятельность взаимовыгодно для обеих сторон.

В штате небольшой организации числится 50 сотрудников, каждый из них обеспечен компьютером, требующим сопровождение системным администратором. Все рабочие станции подключены к локальной сети предприятия, а также к глобальной сети – Интернету. Помимо этого, в офисе присутствует оргтехника, требующая периодического проведения профилактических работ. Для выполнения этой работы руководству компании можно нанять сотрудника, а можно передать эти функции на аутсорсинг. Рассмотрим оба варианта и рассчитаем экономический эффект от использования ИТ-аутсорсинга.

Целесообразно принимать на должность системного администратора двух человек, это обеспечит непрерывную работу организации в случае отпуска или больничного листа одного из

них. Системный администратор выполняет следующие виды работ: установка и настройка компьютеров, оргтехники, программного обеспечения, монтаж оборудования, обеспечение непрерывной работы сетевого оборудования, восстановление работоспособности локальной сети и компьютеров при сбое и/или выходе из строя того или иного оборудования, а также обучения пользователей работе в локальной сети организации и составление инструкций по работе с программным обеспечением.

Кроме заработной платы системным администраторам и отчислений на страховые взносы на предприятии также высоки затраты на оплату телефонных переговоров, Интернет, закупку оргтехники, сетевого оборудования и др.

При помощи экспертов-экономистов были рассчитаны максимально точно затраты для организации работы системного администратора, которые перечислены ниже.

1. Средняя заработная плата системного администратора составляет 20 тысяч рублей.

2. Страховые взносы составляют 30 % от заработной платы.

3. Компьютеры. Каждый системный администратор обеспечен компьютером, стоимость одного компьютера составляет 25 тысяч рублей.

4. Программное обеспечение. Стоимость комплекта программного обеспечения для системного администратора на один компьютер составляет 22,5 тысячи рублей.

5. На телефонные переговоры расходуется примерно 20 тысяч рублей в год.

6. Расходы на канцелярские товары составляют 16 тысяч рублей в год.

7. Амортизационные отчисления на основные средства, используемые сотрудниками (мебель, бумага и т.д.), составляют 12 тысяч рублей в год на человека.

8. Стоимость комплектующих для ремонта и замены сетевого оборудования, а также стоимость заправки и восстановления картриджей составляет 110 тысяч рублей.

Общая сумма годовых затрат на организацию работы системных администраторов представлена в таблице.

Также были выделены косвенные виды потерь – недополученная прибыль по причине невыполнения плана работы из-

за простоя оборудования. Ежегодно такие потери могут составлять 10 % от прибыли, т.е. примерно 100 тысяч рублей в год. Таким образом, для расчета целесообразности внедрения ИТ-аутсорсинга на предприятии были приняты расходы на организацию работы системных администраторов в сумме 977 тысяч рублей в год.

Годовые затраты на обеспечение работы системных администраторов

Затраты по видам	Сумма, тыс. руб. в год
Заработная плата	480
Страховые взносы	144
Компьютеры	50
Программное обеспечение	45
Телефонные переговоры	20
Канцелярские товары	16
Амортизационные отчисления	12
Комплектующие, заправка и восстановление картриджей	110
Итого:	877

Далее определим стоимость услуг аутсорсеров на рынке, которая зависит, в первую очередь, от количества компьютеров, нуждающихся в постоянном обслуживании, и количества используемой оргтехники. В стоимость входят экстренный вызов специалиста в случае форс-мажорных обстоятельств, профилактические работы (ограниченное количество выездов) и телефонная поддержка пользователей. Проведенный анализ стоимости услуг компаний-аутсорсеров, представленных в г. Новокузнецке, показал, что ежемесячное обслуживание компьютеров для предприятия, оборудованного 50 рабочими местами, колеблется в пределах от 20 тысяч до 45 тысяч рублей, т.е. годовые услуги аутсорсера могут составлять от 240 тысяч до 540 тысяч рублей. Проведем предварительный расчет экономического эффекта при максимальной стоимости услуг, т.е. 540 тысяч рублей в год. При данных условиях минимальная экономическая выгода составит 437 тысяч рублей в год (977 тыс. руб. – 540 тыс. руб.);

при этом руководству организации не требуется нанимать дополнительных сотрудников и оборудовать им рабочие места. Отсюда следует, что экономическая эффективность внедрения аутсорсинга на предприятии в рассмотренном примере составляет около 44 %.

Таким образом, можно говорить о целесообразности внедрения ИТ-аутсорсинга в организациях, нуждающихся в обслуживании компьютеров, основная деятельность которых не связана с информационными технологиями.

Также одним из наиболее эффективных, но одновременно и самых дорогостоящих способов защиты от некоторых рисков является страхование. Из практики следует, что к страхованию прибегают при возникновении опасности форс-мажорных обстоятельств.

Страхованием называется система мероприятий по созданию денежного (страхового) фонда за счет взносов его участников, из средств которого возмещается ущерб, причиненный стихийными бедствиями, несчастными случаями, а также выплачиваются иные денежные суммы в связи с наступлением определенных событий.

Страхование информационных рисков предприятия – это метод защиты информации в рамках финансово-экономического обеспечения системы защиты информации, основанный на выдаче страховыми обществами гарантий субъектам информационных отношений по возмещению материального ущерба в случае реализации угроз информационной безопасности [1].

Поскольку страхование является достаточно дорогим методом защиты, не следует применять его повсеместно и необдуманно. Страхование целесообразно внедрять в том случае, если вероятность реализации риска мала, но при этом ущерб может быть значительным. Кроме того, в случае низкого потенциального ущерба при высокой вероятности реализации угрозы применение страхования будет обоснованным. Также важно обратить внимание на ценность информации; если ее утрата или модификация несут существенные для организации или возможно ее быстрое восстановление, то стоит направить большую часть средств на страхование, в противном случае следует уделить больше внимания в первую очередь различным защитным мерам.

У страхования две роли: предупредительная и мотивационная. Под предупредительной понимается свойство страхования побуждать страхователя, т.е. организацию, передающую риск, увеличивать отчисления на предупредительные мероприятия. Под мотивационной ролью страхования будем понимать его свойство побуждать страхователей выбирать действия, снижающие ущерб от наступления страховых случаев [4].

На основе модели взаимодействия страховщика с одним страхователем (в этой роли выступает ИТ-провайдер, а модель задана в виде ограничений, приведенных в постановке задачи) дадим ниже постановку задачи разработки системы страхования от рисков [3].

Дано:

1. Основные нормативные акты законодательства по страхованию;

2. Стоимость активов страхователя, D ;

3. Сумма расходов, запланированная страхователем для предупредительных мер, v ;

4. Вероятность наступления страхового случая, P ;

5. Доход страхователя, $H(D)$, который определяется объемом оказанных ИТ-услуг, $U \geq 0$;

6. Ограничения: **1)** суммарные страховые взносы не должны быть ниже ожидаемых выплат, т.е. $\omega \geq EW$, где ω – сумма страхового взноса: $\omega = \delta_0 W$, δ_0 – нетто-ставка, W – величина, определяющая размер текущих сумм выплат за рассматриваемый промежуток времени; EW – математическое ожидание текущей суммы выплат; **2)** нетто-ставка должна быть не меньше вероятности наступления страхового случая: $\delta_0 \geq P$.

7. Критерий: целевая функция страхователя: $Ef(v, D) = H(D) - Z(D) - v - k(v, D) + p(v, D) [(1 + \varepsilon)V(v, D) - \Delta W]$, где v – сумма, затрачиваемая на предупредительные меры, $p(v, D)$ – вероятность наступления страхового случая, $Z(D)$ – затраты страхователя, ε – параметр, отражающий степень несклонности страхователя к риску ИТ-сервиса (оценивается экспертом), $k(v, D)$ – страховой взнос, $V(v, D)$ – страховое возмещение, ΔW – размер ущерба страхователя от реализации риска.

Требуется: разработать систему страхования рисков при выполнении ограничений и максимизации целевой функции страхователя.

Самым большим недостатком такого способа защиты от рисков, как страхование, является его дороговизна. Поэтому прежде чем применять его на практике, нужно провести тщательный анализ и оценку возможных рисков и убедиться в том, что применение этого способа целесообразно.

Решение этой задачи привело к выявлению условий, при выполнении которых принимать защиту от рисков путем страхования выгодно.

Простейшие зависимости затрат и дохода от действий страхователя:

$$(1) \quad H(D) = C \cdot D; Z(D) = Z_0 + \alpha_0 D,$$

где C – цена реализации продукции/услуги, Z_0 – постоянные издержки, α_0 – удельные переменные издержки. Из условия $H(D) - Z(D) - v \geq 0$ можно определить точку безубыточности, т.е. тот минимальный объем производства $D_0(v)$, при котором деятельность страхователя еще выгодна: $D_0(v) = (Z_0 + v)/(C - \alpha_0)$.

При отсутствии системы страхования целевая функция страхователя имеет вид

$$(2) \quad Ef(v, D) = H(D) - Z(D) - v - p(v, D)\Delta W.$$

Оптимальной стратегией страхователя будет выбор (v^*, D^*) таких, что:

$$(3) \quad \begin{cases} \frac{\partial p(v^*, D^*)}{\partial D} = \frac{\beta_0}{\Delta W}, \\ \frac{\partial p(v^*, D^*)}{\partial v} = -\frac{1}{\Delta W}, \end{cases} \quad \text{где } \beta_0 = C - \alpha_0.$$

Рассмотрим пример, который показывает вышеописанные зависимости.

Пусть $p(v, D) = e^{-k_v v} (1 - e^{-k_D D})$, где k_v и k_D – положительные константы. Решая уравнения (3), получаем:

$$(4) \quad \begin{aligned} v^* &= \frac{1}{k_v} \ln \left(\frac{\Delta W k_u k_D}{k_u + \beta_0 k_D} \right), \\ D^* &= \frac{1}{k_D} \ln \left(1 + \frac{k_D}{\beta_0 k_v} \right). \end{aligned}$$

Ожидаемые потери при этом равны $1/kv$.

В случае страхования, при котором ущерб компенсируется полностью, т.е. $V = \frac{\Delta W}{1 + \varepsilon}$, оптимальной стратегией страхователя без учета ограничения безубыточности будет выбор таких (v^*, D^*) , что:

$$(5) \quad \begin{aligned} \frac{\partial k(v^*, D^*)}{\partial D} &= \beta_0, \\ \frac{\partial k(v^*, D^*)}{\partial v} &= -1. \end{aligned}$$

Если $\varepsilon_0(v, D)$ – нагрузка к нетто-ставке страхования, а также имеет место следующее соотношение:

$$(6) \quad k(v, D) = \frac{\varepsilon_0(v, D) + p(v, D)}{1 + \varepsilon} \Delta W,$$

тогда (5) примет вид:

$$(7) \quad \begin{aligned} \varepsilon'_{0D}(v^*, D^*) + p'_D(v^*, D^*) &= \frac{\beta_0(1 + \varepsilon)}{\Delta W}, \\ \varepsilon'_{0v}(v^*, D^*) + p'_v(v^*, D^*) &= -\frac{1 + \varepsilon}{\Delta W}. \end{aligned}$$

В рамках рассматриваемой модели оптимальной стратегией страховщика является выбор зависимости $\varepsilon_0(\cdot)$ нагрузки к нетто-ставке от затрат на предупредительные мероприятия и действий страхователя.

Таким образом, в статье были рассмотрены такие понятия, как управление ИТ-услугами, ИТ-сервис. Дано определение информационного риска, для защиты от которого предложено два способа: передача риска на аутсорсинг и страхование от него. На конкретном примере доказана эффективность использования на малом предприятии принципа передачи информационных рисков на аутсорсинг. Также даны постановка задачи разработки системы страхования от рисков и условия, при выполнении которых выгодно принимать защиту от рисков путем страхования.

Литература

1. ДЬЯКОНОВ Д. *Страхование информационных рисков как метод защиты информации* // Хозяйство и право. – 2001. – № 3. – С. 25–33.
2. ЗИМИН В.В., ИВУШКИН А.А., КУЛАКОВ С.М. *Управление жизненным циклом сервисов систем информатики и автоматизации: учеб. пособие.* – Кемерово; М.: Российские университеты: Кузбассвуиздат, АСТШ, 2012. – 437 с.
3. КИСЕЛЕВА Т.В., МАСЛОВА Е.В. *Риски ИТ-сервиса и страхование как способ их устранения* // Перспективы развития науки и образования: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. – М.: АР-консалт, 2014. – С. 55–57.
4. *Механизмы страхования в социально-экономических системах* / В.Н. БУРКОВ, А.Ю. ЗАЛОЖНЕВ, О.С. КУЛИК, Д.А. НОВИКОВ. – М.: ИПУ РАН, 2001. – 109 с.

METHODS OF MANAGING THE RISKS OF IT SERVICE AS THE RESULT OF THEIR INSURANCE AND TRANSFER TO OUTSOURCING

Elena Maslova, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, graduate student (elenamaslova1805@yandex.ru).

Abstract: in the article it is suggested to use outsourcing as a protective measure in case of high probability of realizing the risks of IT services. It is calculated the economic efficiency from the introduction of IT outsourcing in a small enterprise, which proves the feasibility of its implementation. The task of developing a risk insurance system is also given, and the conditions under which it is beneficial to use this protective measure are given.

Keywords: IT service, IT outsourcing, insurance.

УДК 007.51 + 004.8
ББК 6/8 (Ю) 65.050.2

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА «СОЕДИНЕНИЯ КРЕАТИВНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ» В ЗАДАЧАХ ВЫБОРА

Харитонов В.А.¹, Кривогина Д.Н.², Сафонов Н.И.³
*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

В статье представлена разработка механизма алгоритмического обеспечения задач ранжирования и выбора на основе линейных сверток, а также известного положения Стива Джобса о целесообразности «соединения креативности и технологичности». Представленный механизм позволяет сократить путь между интуитивным пониманием задачи выбора и представлением ее решения в информационной среде за счет отказа от вербального описания работы интуиции в данном классе задач. Представленные авторские технологии моделирования индивидуальных предпочтений и их композиций позволяют «превзойти человеческую природу и покорить вселенную» в вопросах неманипулируемости и принятия согласованных решений.

Ключевые слова: субъектно-ориентированное управление, комплексное оценивание, ранжирование, квантирование, манипулирование.

1. Введение

Всякое управление субъективно [4], поскольку всегда может быть сопоставлено с субъективным выбором наилучшего управленческого решения на множестве альтернатив. Интересно заметить, что успешный выбор наиболее перспективных реше-

¹ Валерий Алексеевич Харитонов, доктор технических наук, профессор (sems@pstu.ru).

² Дарья Николаевна Кривогина, аспирантка (darya.krivogina@gmail.com).

³ Никита Игоревич Сафонов, аспирант (saf.nikita@gmail.com).

ний вполне соответствует поведению демона Максвелла, которое заключается в открытии «виртуальной дверцы» в закрытом сосуде для движущихся внутри него привилегированных молекул. Следовательно, это действие соответствует решению актуальной проблемы противодействия второму началу термодинамики – «тепловой смерти мира». Однако бесценный дар субъективного выбора, свойственный только человеку [4], имеет противопоказания к применению в случаях сложности задач выбора по параметрам многоальтернативности, многофакторности исходных данных и чувствительности к их динамике, а также в условиях опасности манипулирования результатами со стороны внешней среды. Ключ к преодолению издержек субъективности управления при сохранении ее несомненного позитивного вклада лежит в области «механизации» ментальной деятельности человека [2] в задачах выбора на основе моделирования его предпочтений с использованием информационных и математических технологий. В работе обсуждаются авторские технологии моделирования индивидуальных предпочтений и их композиций, которые наряду с известными направлениями развития идей кибернетики: («Кибернетика», «Кибернетика второго порядка», «Аутопоезис», «Гомеостатика», «Концептуальные кибернетики третьего и четвертого порядков», «Неокибернетика», «Кибернетика третьего порядка», «Новая кибернетика, посткибернетика», «Методология управления» и «Эвергетика») позволяют «превзойти человеческую природу и покорить вселенную» [3], в том числе в вопросах неманипулируемости и принятия согласованных решений.

2. Механизм комплексного оценивания в задачах выбора

В основе исследования лежит разработка нового алгоритмического обеспечения задач ранжирования и выбора на основе линейных сверток, а также известного положения Стива Джобса о целесообразности «соединения креативности и технологичности» [1]. Представленный механизм является механизмом нового поколения, позволяющим сократить путь между интуитивным пониманием задачи выбора и представлением ее решения в информационной среде за счет отказа от вербального описа-

ния работы интуиции в данном классе задач. Продемонстрируем механизм комплексного оценивания на примере задачи выбора строительного материала (далее – СМ) из представленного множества альтернатив для возведения стен жилого дома. В качестве альтернатив примем следующие материалы: дерево (сосна), силикатный кирпич, керамический кирпич, газобетон, керамзитобетон и стеклофибробетон.

Работа механизма состоит из двух основных разделов. Первый раздел представляет собой разработку искусственного интеллекта модели поведения конкретного субъекта в задаче выбора. Процесс моделирования на данном этапе осуществляется с использованием интуиции с точки зрения ожидания будущих результатов, при этом не моделируются человеческие предпочтения на всем множестве альтернатив, а задаются ограничения области человеческих предпочтений.

Данный раздел процесса моделирования МКО включает в себя следующие процедуры: выбор множества существенных характеристик, перевод выбранных характеристик в универсальную шкалу механизма комплексного оценивания (далее – МКО) и их дальнейшее ранжирование и квантирование.

Выбор множества характеристик из представленного подмножества (табл. 1) осуществляется с отношением строгого или нестрогого порядка.

Процесс обоснования состава существенных характеристик осуществляется при помощи интуиции с условием исключения возможности принятия лишних характеристик в качестве существенных (избежание усложнения задачи) и отказа от существенных, без которых невозможно получение отношения строгого или нестрогого порядка (рис. 1).

На следующем этапе представленного раздела осуществляется квантирование выбранных характеристик в качественной шкале комплексного оценивания 1–4. При помощи функций приведения (далее – ФП) происходит перевод принятых характеристик из фазового пространства в квалитметрическое. Функция приведения строится отдельно для каждой принятой характеристики, в качестве примера рассмотрим ФП теплопроводности (рис. 2).

Таблица 1. Выбор существенных характеристик СМ

Характеристики строительных материалов	Предпочтительные характеристики
Прочность при сжатии	Прочность при сжатии
Прочность на изгиб	Теплопроводность
Теплопроводность	Плотность
Паропроницаемость	Морозостойкость
Усадка	
Водопоглощение	
Морозостойкость	
Звукоизоляция	
Плотность	
Огнестойкость	
Экологичность	
Устойчивость к биологическому воздействию	



Рис. 1. Состав существенных характеристик СМ

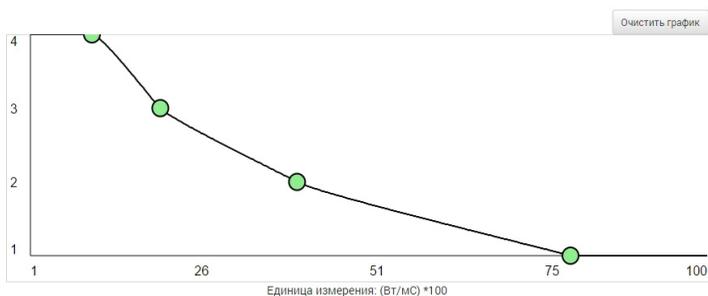


Рис. 2. Построение функции приведения для характеристики теплопроводность

Далее осуществляется процесс ранжирования характеристик (факторов) по важности, т.е. определение взвешенных коэффициентов линейной свертки (рис. 3), сумма которых должна равняться 1.

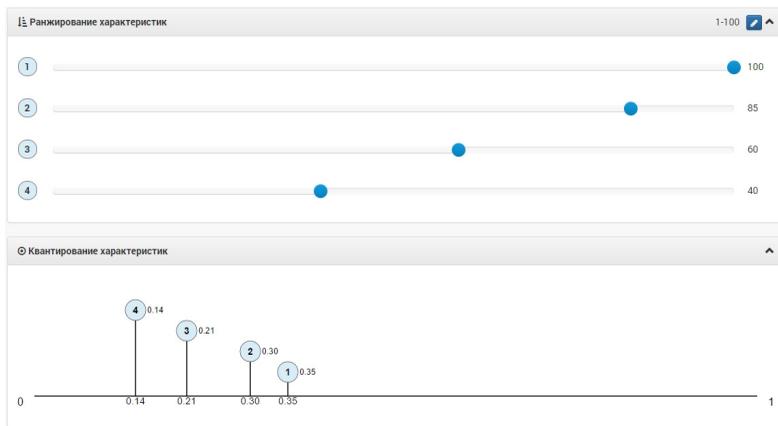


Рис. 3. Ранжирование и определение взвешенных коэффициентов

Конкретный выбор субъектом альтернатив из представляемого множества должен начинаться с их ранжирования. Если на этапе ранжирования субъект управления не сможет построить отношение строгого порядка, то ему необходимо вернуться на предыдущий этап выбора множества существенных характеристик для введения в модель дополнительной характеристики. После установления строгого порядка и ограничения допуска к изменениям ее параметров данная модель становится неманипулируемой для внешних влияний и готова к решению семейства прикладных задач ранжирования и выбора на представленных множествах альтернатив. Иными словами, волеизъявления субъекта управления заканчиваются на данном этапе построения модели.

Второй раздел представляемого механизма полностью посвящен работе с множеством представляемых альтернатив (табл. 2).

Таблица 2. Альтернативы СМ и их характеристики

Характеристики СМ, ед. изм.	Альтернативы СМ					
	Дерево (сосна)	Силикатный кирпич	Керамический кирпич	Газобетон	Керамзитобетон	Стеклофибробетон
Прочность, МПа	40	100	100	4	60	70
Плотность, кг/м ³	500	1800	1800	500	1000	2000
Морозостойкость, цикл	200	50	150	50	50	200
Теплопроводность, Вт/мС	0,15	0,6	0,56	0,13	0,2	0,65

При помощи построенной модели осуществим выбор наиболее подходящего строительного материала из представленных альтернатив.

Данный раздел включает в себя следующие процедуры: ввод физических значений, выбранных на первом этапе характеристик альтернатив (рис. 4).

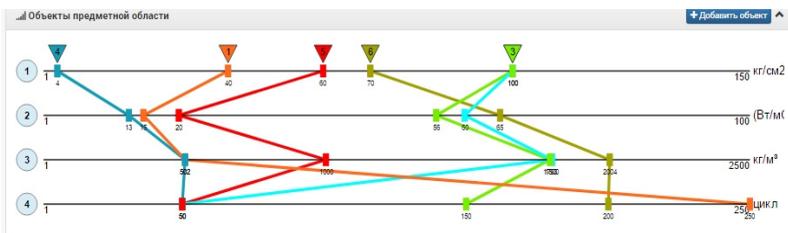


Рис. 4. Объекты предметной области

Следующей процедурой является ранжирование представленного множества альтернатив. Данная процедура выполняется автоматически и является завершающей в работе данного механизма (рис. 5). Материал, имеющий наибольшую комплексную оценку, является наилучшей альтернативой.

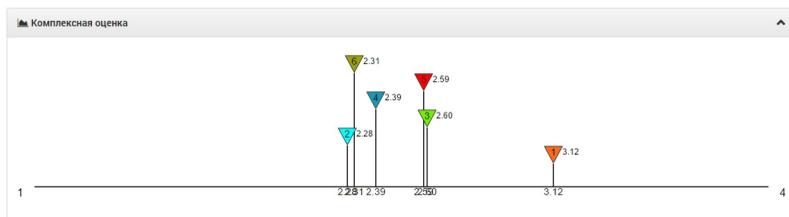


Рис. 5. Комплексные оценки альтернатив

Представленный инструмент готов для квантирования любого представленного подмножества альтернатив из данного класса строительных материалов. На основе данного ранжированного ряда можно построить несколько вариантов выбора (отбросить худших, выбрать 2–3 лучших, отследить динамику изменения ранжирования альтернатив). Кроме этого модель позволяет формулировать пожелания потребителя к коррекции отдельных типов материала с целью их улучшения. Все это предполагает дополнительные вложения инвестиций в выборную характеристику для ее перемещения в начало ранжированного ряда за счет улучшения ее параметров.

3. Заключение

Приведенные результаты исследования связаны с разработкой нового алгоритмического обеспечения на основе фундаментального положения Ст. Джобса о «соединение креативности и технологичности» и свидетельствуют о возможности сокращения путей преобразования обстоятельств и результатов ментальной управленческой деятельности в наглядное представление. Выполнение этого принципа приводит к тому, что решение задач механизации процедур выбора становится свободным от необходимости специальной подготовки широкого круга субъектов управления. Это новое обстоятельство может стать решающим для широкого внедрения новых интеллектуальных технологий в практику процессов управления в ноосфере.

Литература

1. Айзексон У. *Стив Джобс* / пер. с англ. Д. Горячиной, Ю. Полищук, А. Цырульниковой, А. Череденко. – М.: Астрель: CORPUS, 2012. – 688 с.
2. *Инструментальные средства «соединения креативности и технологичности» в задачах субъектно-ориентированного управления* [Электронный ресурс] / В.А. Харитонов, А.М. Гревцев, Д.Н. Кривоги́на, Н.И. Сафонов, А.В. Вычегжанин // Математические и инструментальные методы экономики (101) УЭКС. – 2017. – № 7. – URL: <http://uecs.ru/instrumentalnii-metody-ekonomiki/item/4474-2017-06-27-08-20-00> (дата обращения: 06.07.2017).
3. НОВИКОВ Д.А. *Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития*. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 160 с.
4. ХАРИТОНОВ В.А., АЛЕКСЕЕВ А.О., КРИВОГИНА Д.Н. *Парадигма инженерной поддержки технологий субъектно-ориентированного управления* [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электрон. науч. журнал Кубан. гос. аграр. ун-та (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2015. – № 05(109). С. 690–706. – IDA [article ID]: 1091505043. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/08/pdf/15.pdf> у.п.л.

TOOLS OF "CREATIVITY AND TECHNOLOGY CONNECTIVITY" IN CHOICE OF SELECTION

Valerii A. Kharitonov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Civil Engineering and Material, Perm National Research Polytechnic University 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia; e-mail: cems@pstu.ru.

Dar'ya Krivogina, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia; e-mail: darya.krivogina@gmail.com.

Nikita Safonov, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia; e-mail: saf.nikita@gmail.com.

Abstract: The article presents the development of a mechanism for algorithmically providing ranking and selection tasks based on linear bundles, as well as Steve Jobs's famous position on the appropriateness of "connecting creativity and manufacturability". The presented mechanism allows us to shorten the path between an intuitive understanding of the problem of choice and the representation of its solution in the information environment by refusing to give a verbal description of the work of intuition in this class of problems. The presented author's technologies of modeling individual preferences and their compositions allow "to transcend human nature and conquer the universe" in questions of non-manipulability and acceptance of coordinated decisions.

Keywords: Subject-oriented management, complex estimation, ranking, quantization, manipulation.

УДК 519.6 + 519.8
ББК 22.19+20.1

ТРЕХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ УРБАНИЗАЦИИ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ

Воронин А.А.¹, Исаева И.И.²

(Волгоградский государственный университет,
Волгоград)

В настоящей работе с помощью когнитивной модели представлена проблема негативного влияния процесса урбанизации на природу Волго-Ахтубинской поймы. Описаны двух- и трехуровневая иерархические игры, соответствующие неуправляемому и управляемому процессу урбанизации. С использованием аналитических и численных методов произведен сравнительный анализ игровых равновесий. На основе геоинформационного и гидродинамического моделирования исследована эффективность управления при различных стратегиях пространственного распределения продаваемых участков территории.

Ключевые слова: Волго-Ахтубинская пойма, механизмы эколого-экономического управления, иерархическая игра, имитационное моделирование.

1. Введение

Волго-Ахтубинская пойма (ВАП) является уникальным природным образованием в нижнем течении р. Волги, жизнь которого определяется ее весенним паводком. Волжская ГЭС (ВГЭС) регулирует подчиненный интересам гидроэнергетики гидрологический режим р. Волги, который характеризуется существенным снижением объема весеннего паводка по сравне-

¹ Александр Александрович Воронин, доктор физико-математических наук, профессор (voronin.prof@gmail.com).

² Инесса Игоревна Исаева, студент (isaeva-inessa@mail.ru).

нию с природным. Факторами обезвоживания пойменной территории являются ограничение паводковых пиков требованиями гидрологической безопасности расширяющихся сельскохозяйственных и урбанизированных территорий, природная и антропогенная деградация ее многочисленных малых русел [3].

Активная неуправляемая урбанизация может значительно ускорить деградацию пойменной природы. Таким образом, актуальной задачей является создание научно обоснованной системы управления процессом урбанизации ВАП, обеспечивающей устойчивость экосистемы, интересы населения, хозяйствующих субъектов, органов власти.

2. Когнитивная модель

Для построения когнитивного графа выделены основные группы акторов системы: коллективный агент (КА) – покупатель земли в ВАП, управляющие центры (муниципальный (МЦ) и федеральный (ФЦ)), приоритеты функционирования и развития: гидрологическая безопасность, экологический и социохозяйственный приоритеты. Общий долгосрочный приоритет – сохранение экосистемы ВАП, краткосрочный – сохранение площади территории паводкового затопления. Выявлены следующие основные факторы, оказывающие влияние на урбанизацию ВАП:

- 1) объем весеннего паводка,
- 2) состояние малых русел ВАП,
- 3) средняя площадь паводкового затопления ($S_f(S)$),
- 4) площадь хозяйственных земель,
- 5) предельное значение площади затопляемой территории,
- 6) показатель состояния пойменной экосистемы (Φ),
- 7) уровень хозяйственной активности в пойме,
- 8) показатель качества жизни,
- 9) уровень развития инфраструктуры,
- 10) число жителей в ВАП,
- 11) максимальная площадь, предлагаемая для продажи,
- 12) значение целевой функции КА (f_A),
- 13) площадь приобретаемой территории (S),
- 14) цена продаваемых земель (p),

- 15) значение целевой функции МЦ (f_M),
- 16) значение целевой функции ФЦ (f_F),
- 17) величина штрафа (R).

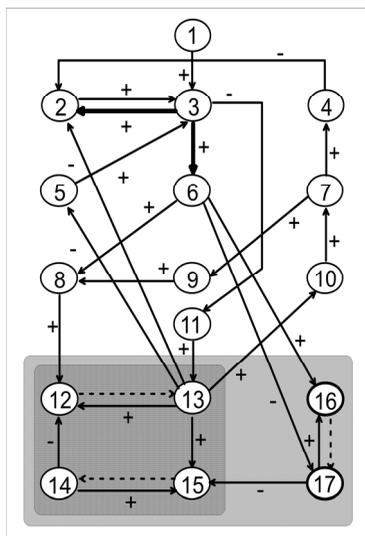


Рис. 1. Когнитивный граф неуправляемого и управляемого развития ВАП

На рис. 1 связи обозначены сплошными линиями с соответствующими символами «+» и «-», принятие решений – пунктирными линиями, тонкие линии отражают быстрые взаимодействия, а жирные – медленные. Граф содержит неустойчивые циклы быстрых и устойчивые медленных взаимодействий. Когнитивный граф неуправляемого развития ВАП включает вершины 1–15. Как показывает анализ графа, медленная стабилизация процесса урбанизации при высоком платежеспособном спросе обусловлена исчерпанием доступной территории и/или падением качества жизни в ВАП при деградации пойменной экосистемы. Вершины 16–17 и соответствующие им ребра графа описывают элементы механизмов управления, целью которого является изменение экологических и социально-экономических параметров равновесия.

3. Теоретико-игровые модели. Поиск аналитического решения

На рис. 1 выделена группа взаимодействующих вершин 12–15, входящих в теоретико-игровую модель неуправляемого процесса купли-продажи земель ВАП с двумя участниками. Продавцом выступает МЦ, покупателем – КА. Математическая формулировка задачи поиска гарантирующего игрового равновесия в иерархической игре Штакельберга Γ_1 имеет вид:

$$(1) \quad f_M = Sp \rightarrow \max_p, \quad f_A = f_A^0(\Phi(S_f), S) - Sp \rightarrow \max_S, \\ 0 \leq S \leq S_0, p \geq 0,$$

где S_0 – вся площадь ВАП, f_A^0 – функция полезности КА.

Решение этой задачи для простейших функций $f_A^0 = aS_f S$, $S_f = -S_f^0 S / S_0 + S_f^0$ ($a \geq 0$ – учитывающий спрос нормирующий параметр, $S_f^0 = S_f(0)$) имеет вид:

$$(2) \quad S = \frac{S_0}{4}, \quad S_f = \frac{3}{4} S_f^0, \quad p = \frac{S_f^0}{2}, \quad f_M = \frac{aS_f^0 S_0}{8}, \quad f_A = \frac{aS_f^0 S_0}{16}.$$

Добавление в задачу (1) механизма эколого-экономического управления [1], включающего штраф в отношении МЦ, со стороны ФЦ, можно представить в форме следующей трехуровневой иерархической игры Γ_1 :

$$(3) \quad f_F = \sigma f_F^0(\Phi) + (1 - \sigma)R(\Phi) \rightarrow \max_R, \\ f_M = Sp - R(\Phi) \rightarrow \max_p, \quad f_A = f_A^0(\Phi(S_f), S) - Sp \rightarrow \max_S, \\ 0 \leq S \leq S_0, p \geq 0, R(\Phi) \geq 0,$$

где f_F^0 – экологическая полезность ФЦ, $\sigma \in [0; 1]$ – весовой «экологический» коэффициент.

Гарантирующее равновесие в этой игре для простейших функций: $f_A^0 = aS_f S$, $S_f = -S_f^0 S / S_0 + S_f^0$, $f_F^0 = \mu S_f$, $R = \lambda(S_f^0 - S_f)$ ($\mu \geq 0$ – нормирующий коэффициент, $\lambda \geq 0$ – ставка штрафования) имеет вид:

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{S_0}{8}(1-\varepsilon), \quad p = \frac{aS_f^0}{4}(3+\varepsilon), \quad \lambda = \frac{aS_0}{2}(1+\varepsilon), \\
 (4) \quad S_f &= \frac{S_f^0}{8}(7+\varepsilon), \quad f_F = \frac{(1-\sigma)aS_f^0S_0}{16}(1+14\varepsilon+\varepsilon^2), \\
 f_M &= \frac{aS_f^0S_0}{32}(1-\varepsilon)^2, \quad f_A = \frac{aS_f^0S_0}{64}(1-\varepsilon)^2, \quad \varepsilon = \frac{\sigma\mu}{(1-\sigma)aS_0}, \\
 &(0 \leq \varepsilon \leq 1).
 \end{aligned}$$

При $\varepsilon > 1$ сохраняется решение, отвечающее $\varepsilon = 1$. Сравнение (2) и (4) показывает, что эколого-экономическое управление существенным образом уменьшает равновесное значение площади урбанизированной территории и, соответственно, увеличивает среднюю площадь паводкового затопления по сравнению с их равновесными значениями для неуправляемого процесса.

4. Имитационная модель. Поиск численного решения

Различия в условиях паводкового затопления и экологической ценности продаваемых земельных участков позволяют МЦ варьировать стратегии их предложения и, соответственно, вид зависимости $\Phi(S_f)$. В случае упорядоченности продаваемых земель по экологической ценности (часто затапливаемые территории) эта функция выпукла, в случае обратного приоритета – вогнута. При поиске численных равновесий теоретико-игровых моделей (1) и (3), представленных на рис. 2 и 3, с увеличением номера стратегии для функции $\Phi(S_f)$ варьировалась степень от кривой агрессивной урбанизации (выпуклая функция) до кривой минимального экологического ущерба (вогнутая функция).

При исследовании зависимости решений задач (1) и (3) от параметров получено, что для двухуровневой модели при увеличении параметра a результат игрового равновесия приближается к некому предельному значению. При $\Phi(S_f)$, близких к кривой агрессивной урбанизации, увеличение параметра негативным образом влияет на оценку экологического состояния ВАП (рис. 2).

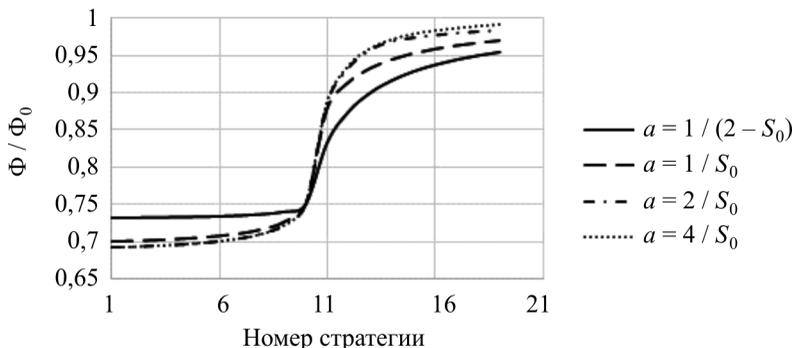


Рис. 2. Изменение равновесного значения оценки экологического состояния двухуровневой модели

При увеличении «экологического» параметра σ (рис. 3) ФЦ допускает все меньшее понижение оценки экологического состояния пойменных территорий как результат покупки территорий, номер стратегии, с которого начинается покупка территорий, увеличивается. Увеличение параметра a способствует понижению ограничения на номер стратегии, с которого начинается покупка территорий.

При сравнении равновесных значений оценки экологического состояния ВАП на рис. 2 и 3 следует вывод, что при реализации трехуровневой игры оценка экологического состояния выше.

Точный вид функции $\Phi(S_f)$ определяется особенностями рельефа и режима паводкового затопления территории ВАП. Для построения цифровой модели рельефа и численного гидродинамического моделирования паводковой динамики применяется программный комплекс «ЭКОГИС» [4]. Используемая в нем численная модель динамики поверхностных вод [5, 6] учитывает все основные факторы затопления территории: поверхностные и подземные источники воды – плотины, осадки, ключи, выход грунтовых вод на поверхность суши; рельеф местности с учетом антропогенной застройки территорий и рельефа дна водоемов; свойства подстилающей поверхности – придонное трение, инфильтрация (новая многослойная нелинейная модель); внутреннее вязкое трение; ветровое воздействие – нагонные волны; вращение Земли – сила Кориолиса; испарение.

Реализованы параллельные OpenMP, CUDA, OpenMP–CUDA–версии расчетного модуля метода CSPH–TVD, позволившие провести большое число имитационных экспериментов по паводковому затоплению территории для разных стратегий предложения к продаже участков территории.

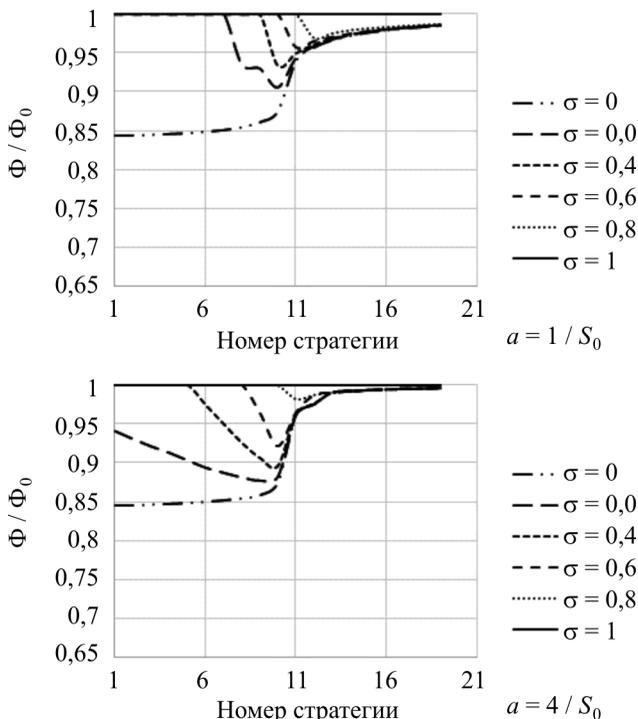


Рис. 3. Изменение равновесного значения оценки экологического состояния трехуровневой модели

Для имитационного построения зависимостей $\Phi(S_j)$ в задачах (1) и (3) использовались рассчитанные в результате численного гидродинамического моделирования с реальными паводковыми гидрографами последних 30 лет цифровые карты максимальных паводковых затоплений и цифровая кадастровая карта северной части ВАП [2].

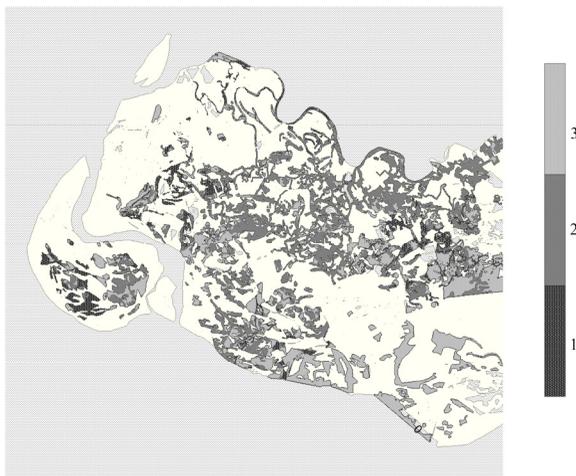


Рис. 4. Карта северной части ВАП (штриховкой обозначены территории потенциальной урбанизации)

Предлагаемые для продажи территории ВАП разделены на часто (1), умеренно (2) и редко (3) затопляемые зоны (рис. 4). Стратегии продажи определяют, в какой последовательности будут предлагаться зоны для выбора из них участков для продажи. Так, стратегии агрессивной урбанизации соответствует последовательность 123 (т.е. сначала для продажи предлагаются территории из зоны 1, выбранные случайным образом. Затем эта процедура проводится для участков из зоны 2, затем – из зоны 3). Соответственно, кривой минимального экологического ущерба соответствует последовательность 321.

Для поиска численного равновесия теоретико-игровых моделей (1) и (3) использовались полученные в ходе численных экспериментов зависимости $\Phi(S_f)$, изображенные на рис. 5.

Исследование зависимости полученных решений от параметров подтверждает полученные ранее выводы. Увеличение «экологического» параметра σ сдерживает урбанизацию, увеличивая номер стратегии, с которого начинается реальная продажа участков территории (рис. 6). Для стратегии минимального экологического ущерба равновесное значение оценки экологического состояния оказывается наибольшим.

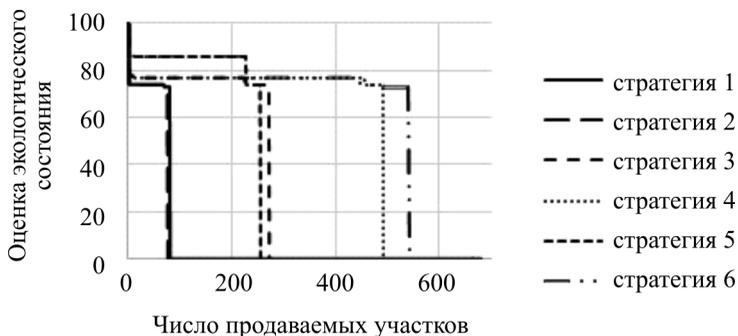


Рис. 5. Функции $\Phi(S_f)$ для разных стратегий урбанизации (1 – агрессивная урбанизация, 6 – минимальный экологический ущерб)

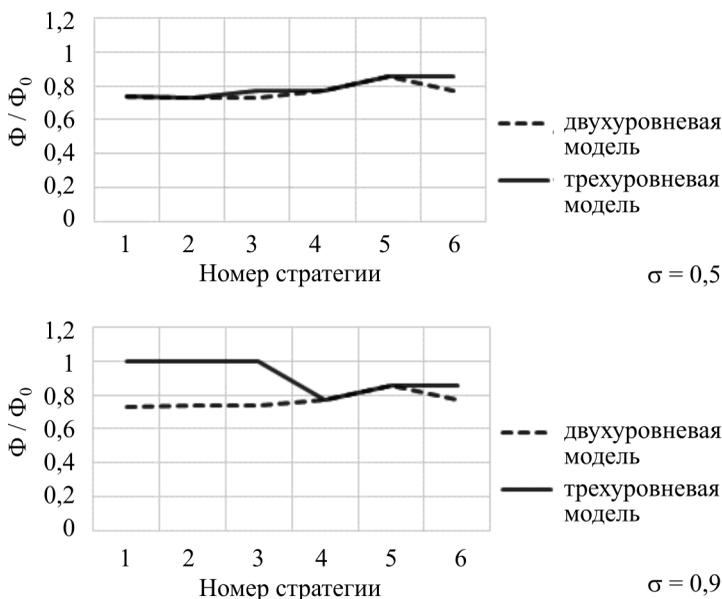


Рис. 6. Сравнение равновесного значения оценки экологического состояния для двух- и трехуровневой моделей

При использовании МЦ любой стратегии равновесные значения функции экологического состояния ВАП в трехуровневой модели выше аналогичных значений в двухуровневой. Таким образом, использование трехуровневой системы управления позволяет существенно снизить негативный экологический эффект урбанизации ВАП.

Выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 16-48-340147.

Литература

1. БУРКОВ В.Н., КОРГИН Н.А., НОВИКОВ Д.А. *Введение в теорию управления организационными системами: учебник* / под ред. Д.А. Новикова. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 264 с.
2. ВОРОНИН А.А., ГРЕБЕНЮК С.Е. *Модель оценки ущерба в слабоустойчивых социоприродохозяйственных системах* // Управление большими системами (УБС'2016): материалы XIII Всерос. школы-конф. молод. ученых / под ред. Д.А. Новикова, В.Г. Засканова; Ин-т проблем управл. им. В.А. Трапезникова РАН; Самар. ун-т. – Волгоград, 2016. – С. 300–311.
3. *Модели и механизмы эколого-экономического управления слабоустойчивыми социоприродохозяйственными системами* [Электронное издание]: монография / А.А. Воронин (науч. рук.) [и др.]; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. А.А. Воронина. – Волгоград: Консалт, 2015.
4. *Программный комплекс для численного моделирования поверхностных вод на основе комбинированного лагранжево-эйлерова метода с SPH-TVD* / С.С. Храпов, А.В. Писарев, А.А. Воронин, А.В. Хоперсков; Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2012614040 от 03.05.2012 г. Заявка № 2012611795 от 13.03.2012 г.
5. *Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH-TVD-подхода* / С.С. Храпов, А.В. Хоперсков, Н.М. Кузьмин, А.В. Писарев, И.А. Кобелев // Вычислительные методы и программирование. – 2011. – Т. 12, № 1. – С. 282–297.

6. *The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage* / S. Khrapov, A. Pisarev, I. Kobelev, A. Zhumaliev, E. Agafonnikova, A. Losev, A. Khoperskov // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2013. – Vol. 2013. – Article ID 787016. – 11 pages.

THREE-LEVEL CONTROL SYSTEM OF THE URBANIZATION PROCESS OF THE VOLGA-AKHTUBA FLOODPLAIN

Alexander Voronin, Volgograd State University, Volgograd, Doctor of Science, professor (voronin.prof@gmail.com).

Inessa Isaeva, Volgograd State University, Volgograd, student (isaeva-inessa@mail.ru).

Abstract: In this paper, we present the problem of the negative influence of the urbanization process on the nature of the Volga-Akhtuba floodplain, using the cognitive model. We describe two- and three-level hierarchical games, corresponding to the uncontrolled and controlled urbanization process, with the tools of game-theoretic modeling. An analytical solution for games with the linear dependence of the average flooded area on the urbanized area is found. We investigate the effectiveness of management with different strategies of spatial distribution of the sold areas of the territory. For this reason, we numerically compute games' equilibriums for dependences derived from the imitational geoinformation and hydrodynamic modeling of flooding.

Keywords: Volgo-Akhtuba floodplain, mechanisms of ecological and economic control, hierarchical game, imitation modeling.

УДК 332.7:[519.86+657.922
ББК 65.223

О ЗНАЧИМОСТИ ФАКТОРОВ, УЧИТЫВАЕМЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОСЕЩАЕМОСТИ ТОРГОВО-РАЗВЛЕКАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Спирина В.С.¹

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Анализируется значимость каждого фактора, влияющего на выбор потребителями того или иного торгового объекта для посещения, в модели оценки качества объектов коммерческой недвижимости. Подтверждается необходимость учета потребительских предпочтений при оценке качества объектов коммерческой недвижимости, в частности торгово-развлекательных комплексов.

Ключевые слова: коммерческая недвижимость; потребительская привлекательность; качество объектов коммерческой недвижимости; торгово-развлекательные комплексы; потребительские предпочтения.

1. Введение

В работах [2] автором была модифицирована и актуализирована для современного использования модель Д.Л. Хаффа, применяемая для определения привлекательности торговых объектов:

$$(1) \quad A_{ij} = \frac{\{Q_j\}}{\{T_{ij}\}^{\lambda_k}},$$

где i – порядковый номер покупателя (под i -м потребителем подразумевается потребитель, расположенный в точке i), j – по-

¹ Варвара Сергеевна Спирина, аспирант (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, spirina@cems.pstu.ru).

рядковый номер объекта коммерческой недвижимости (ОКН), A_{ij} (от англ. *Attractiveness*) – привлекательность j -го объекта недвижимости для i -го потребителя, Q_j (от англ. *Quality*) – качество объекта недвижимости, T_{ij} (от англ. *Time*) – время, затрачиваемое i -м потребителем на дорогу до j -го объекта недвижимости, $\lambda \in [0;1]$ – параметр, отражающий эффект влияния разных типов объектов на воспринимаемые временные затраты (данный параметр находится эмпирически), $\{ \}$ – численное значение параметра.

В общем случае качество ОКН Q зависит от нескольких характеристик x_i , являющихся гетерогенными по отношению друг к другу. В ходе проведенного социологического (маркетингового) исследования посетителей ТРК (торгово-развлекательных комплексов) г. Перми были выявлены восемь частных факторов, влияющих на выбор потребителей в пользу посещения того или иного ТРК: площадь (x_1); эстетический вид (x_2); транспортная доступность (x_3); ассортимент (x_4); наличие брендов (x_5); качество товаров (x_6); акции и скидки (x_7); мероприятия (x_8). Именно эти факторы использованы при разработке многофакторных моделей комплексного оценивания. Данный опрос был открытым, и респонденты сами называли факторы, являющиеся важными для них при посещении ТРК г. Перми.

Вопрос значимости данных факторов в модели ставился, но еще не был исследован, что определило цель настоящей работы.

2. Вычислительный эксперимент

Для определения значимости каждого фактора в модели оценки потребительской привлекательности и качества ОКН, был проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого были рассмотрены все варианты сочетаний учитываемых факторов в модели. При этом фактор «Площадь объекта», имеющийся в оригинальной модели Хаффа, учитывался во всех вариантах. Таким образом, рассматривались сочетания оставшихся 7 факторов модели, образующих при этом $2^7 = 128$ различных вариантов сочетаний.

Качество ОКН в данном эксперименте определялось по формуле

$$(3) \quad Q = \prod_l Q_l(x_l)^{q_l} = Q_1(x_1)^{0,12} \times Q_2(x_2)^{0,15} \times Q_3(x_3)^{0,15} \times Q_4(x_4)^{0,12} \times \\ \times Q_5(x_5)^{0,12} \times Q_6(x_6)^{0,15} \times Q_7(x_7)^{0,11} \times Q_8(x_8)^{0,08},$$

где $Q_l(x_l)$ – значение оценки фактора x_l в относительной шкале $[0, 1]$; q_l – взвешенные коэффициенты, показывающие важность фактора x_l для потребителей, сумма которых должна быть равна единице (данные, полученные в ходе социологического (маркетингового) исследования, в котором респондентам предлагалось оценить, насколько им важен каждый из факторов ТРК).

При расчете вариантов, в которых учитывается лишь часть факторов из модели, взвешенные коэффициенты определялись путем нормирования «весов» учитываемых факторов:

$$(4) \quad q_l' = \frac{q_l}{\sum_{l=1}^8 b_l q_l},$$

где b_l – коэффициент, принимающий значения 1 или 0, в зависимости от того, учитывается ли фактор в модели. Процедура (4) необходима для сохранения свойства равенства единице взвешенных коэффициентов q_l' .

Полученные значения оценки качества исследуемых объектов с помощью модели (2) использовались для вычисления привлекательности исследуемых ТРК (1).

Вычислив привлекательность объекта, а также привлекательности других объектов-конкурентов, можно определить вероятность того, что посетители могут быть привлечены в исследуемый объект:

$$(2) \quad P_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{j=1}^J A_{ij}}.$$

Расчетные значения вероятностей выбора потребителей затем сравнивались с реальными данными о посещаемости этих объектов и производился расчет среднеквадратического отклонения (рис. 2, 3).

На рис. 1 показана суммарная важность факторов в зависимости от сочетаний. Рассмотрены следующие варианты со-

четаний: 1-я группа – учет только 1 фактора «Площадь объекта»; 2-я группа – учет дополнительного к фактору «Площадь объекта» фактора, данная группа имеет 7 вариантов сочетаний; 3-я группа – учет дополнительно еще 2 факторов, данная группа имеет 21 вариант сочетаний; 4-я группа – учет дополнительно 3 факторов, данная группа имеет 35 вариантов сочетаний; 5-я группа – учет дополнительно 4 факторов модели, данная группа образует также 35 вариантов сочетаний; 6-я группа – учет дополнительно 5 факторов модели, образуется 21 вариант сочетаний; 7-я группа – учет дополнительно к фактору «Площадь объекта» еще 6 факторов в модели, образуя 7 вариантов сочетаний; 8-я группа – учет всех 8 факторов в модели.

Из рис. 3 видно, что при учете 3, 4 или 6 факторов можно получить более точную модель, но при этом разброс значений погрешностей вариантов сочетаний выше, чем при учете всех факторов в модели. Отсюда можно сделать вывод о том, что нужно учитывать все восемь факторов в модели.

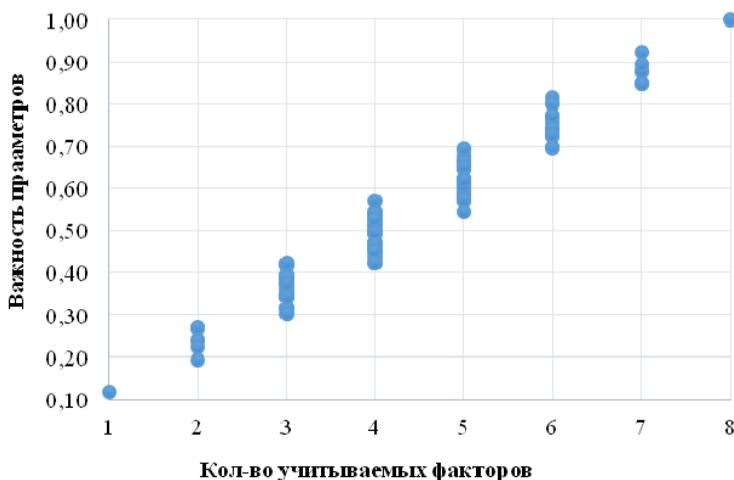


Рис. 1. Суммарная важность факторов (q_i) в зависимости от вариантов их сочетаний

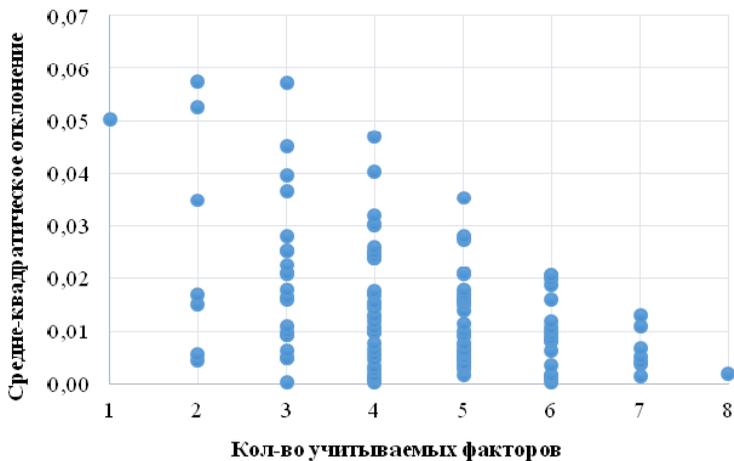


Рис. 2. Среднеквадратические отклонения в зависимости от вариантов сочетаний факторов модели оценки качества ТРК

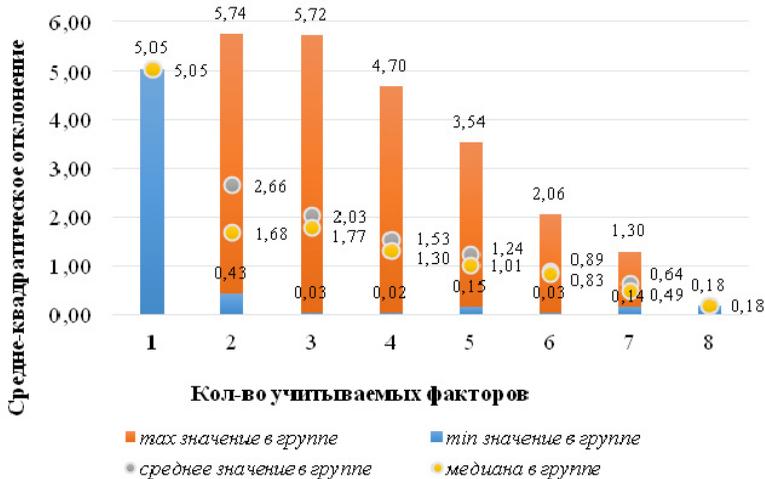


Рис. 3. Диапазоны среднеквадратических отклонений в зависимости от вариантов сочетаний факторов модели оценки качества ТРК

3. Заключение

Из проведенного вычислительно эксперимента видно, что, если учитывать не фактически взятую площадь объекта (m^2), а отношение потребителей и восприятие ими площади объекта, то погрешность модифицированной модели (с учетом только одного фактора «Площадь объекта») относительно оригинальной модели Хаффа снижается. Это еще раз доказывает, что необходимо учитывать предпочтения потребителей.

Напомним, что ранее [2] проводился сравнительный анализ результатов, полученных с помощью модифицированной модели (1) с данными, полученными с помощью оригинальной модели Хаффа [2, формула (2)], и с реальными данными о посещаемости исследуемых объектов (таблица).

Сравнение расчетных вероятностей посещения ТРК с реальными

Методы оценки потребительской привлекательности и вероятностного анализа	Вероятность (P)		
	ТРК «Семья»	ТРК «Колизей»	
Эмпирические данные о посещении ТРК	0,5339	0,4661	
Оригинальная модель Хаффа	0,6473	0,3527	
Модифицированная модель Хаффа	с взвешенной моделью	0,5322	0,4678
	с матричной моделью	0,5317	0,4683

Литература

1. АЛЕКСЕЕВ А.О., СПИРИНА В.С., КОРГИН Н.А. *Технология управления объектом коммерческой недвижимости с учетом потребительских предпочтений* // Управление большими системами. – 2016. – Вып. 62. – С. 124–168.
2. СПИРИНА В.С., АЛЕКСЕЕВ А.О. *Моделирование и прогнозирование посещаемости коммерческой недвижимости на основе оценки ее потребительской привлекательности (на примере торгово-развлекательных комплексов)* // Актуальные проблемы экономики и права. – 2015. – № 1 (33). – С. 209–217.

**ABOUT THE IMPORTANCE OF THE FACTORS
CONSIDERED WHEN MODELLING ATTENDANCE
OF SHOPPING MALLS**

Varvara Spirina, Perm National Research Polytechnic University, Perm, postgraduate student, Faculty of Civil Engineering, Department of Construction Engineering and Materials Science (spirina@cems.pstu.ru).

The importance of each factor influencing the choice by consumers of this or that shopping facility for visit in model of an assessment of quality of commercial real estate objects analyzed. Need of the accounting of consumer preferences at an assessment of quality of commercial real estate objects confirmed, in particular by shopping malls.

Keywords: commercial real estate; consumer appeal; quality of commercial real estate objects; shopping malls; consumer preferences.

УДК 378.146 + 378.147
ББК 74.04(3)

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ ВЫПУСКНИКА ВУЗА

Овчинников А.А.¹

(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)

В настоящей статье рассматривается подход к моделированию накопления усвоенных знаний и приобретённых компетенций на основе кривых научения. Предложенная модель базируется на подходе к измерению усвоенной в ходе обучения полезной информации и позволяет описать логистический и итеративный процессы приобретения знаний, умений и владений как обязательных составляющих компетенций, заявленных в рамках основных профессиональных образовательных программ, реализуемых в вузе. Данная модель легла в основу методики оценивания уровня сформированности компетенций, результаты использования которой были апробированы на ряде образовательных программ, реализуемых в ПНИПУ.

Ключевые слова: кривые научения, негэнтропия, компетенция.

1. Введение

К основной задаче современной системы высшего образования можно отнести построение эффективной системы управления образовательными процессами вуза, что, в свою очередь, обусловливает необходимость разработки и внедрения современного математического и программного обеспечения механизмов оценивания результатов образования выпускника вуза.

Общим проблемам оценивания результатов образования посвящены работы [1; 14–16; 17]. Разработке информационно-

¹ Александр Андреевич Овчинников, аспирант (alex.talking@mail.ru).

аналитических систем вуза, включая инструментарий для оценки уровня сформированности компетенций выпускника, посвящены работы [2–5, 7, 8, 11, 13].

Однако остались нерешенными вопросы, связанные с обоснованием комплексного оценивания уровня сформированности компетенций студента и автоматизации системы оценивания результатов образования в вузе, что подтверждает актуальность темы исследования.

2. Модели оценивания

Самый простой путь получения комплексной оценки уровня сформированности отдельной компетенции – это простое осреднение всех итоговых оценок промежуточной аттестации, полученных студентом при освоении дисциплин (разделов), участвующих в формировании этой компетенции. Кстати, таким путем идут во многих вузах. Однако такой подход не позволяет получить объективную оценку в силу принятых гипотез равнозначности всех оценок и линейности свертки.

Для того чтобы избежать равнозначность вклада различных дисциплин при линейном свертывании частных оценок, возможно введение весовых коэффициентов, учитывающих важность каждой дисциплины (например, с учетом объема трудоемкости дисциплины) при формировании соответствующей компетенции. Однако это, во-первых, требует субъективных оценок весовых коэффициентов, а, во-вторых, такой подход не учитывает нелинейность процесса формирования компетенции и особенности освоения учебного материала при изучении различных дисциплин (практических разделов) образовательной программы.

Недостаток *линейного* свертывания можно исключить использованием нелинейных сверток, в частности, матричных, которые учитывают предпочтения экспертов на влияние каждой частной оценки конкретных дисциплин на общий уровень сформированности компетенции. Однако это требует дополнительной экспертизы, что затрудняет применение данного подхода в условиях учебного процесса вуза.

Можно избежать всех перечисленных сложностей, применив методику, которая основана на построении **кривых научения** (КН) [10], учитывающих как нелинейность процесса формирования компетенции, так и особенность достижения образовательных результатов в рамках освоения отдельных дисциплин. Многие исследователи занимались проблемой построения кривых научения [6, 9, 10, 19].

В процессе формирования компетенции у студента происходит повышение упорядоченности его знаний в некоторых предметных, а также межпредметных областях, т.е. происходит снижение энтропии обучающегося в ходе приобретения и усвоения полезной информации – **негэнтропии**. В данной работе предлагается сопоставление текущего уровня сформированности компетенции с количеством накапливаемой у студента на протяжении образовательного процесса информации, которая может измеряться в зачётных единицах или академических часах. В представленном исследовании рассматриваются два процесса усвоения полезной информации в ходе обучения: итеративный и логистический. В итеративном процессе заложена гипотеза о том, что скорость усвоения информации пропорциональна скорости её поступления и уменьшается с ростом уже усвоенной информации, тогда данный процесс описывается следующим соотношением, характеризующим экспоненциальную кривую научения (рис. 1, а):

$$(1) \quad y(t) = y_{\max} + (y_0 - y_{\max}) \exp(-\beta t), \quad t \geq 0, \quad \beta > 0, \quad y_{\max} > y_0,$$

где t – время обучения, $y(t)$ – уровень накопленной негэнтропии на момент времени t , y_0 – начальное значение количества негэнтропии, y_{\max} – максимально возможное значение накопленной негэнтропии, β – некоторая неотрицательная константа, определяющая скорость обучения.

Логистический процесс формирования умений и владений у студентов предполагает наличие необходимых знаний, от объема которых зависит скорость обучения методам решения поставленных задач. Кроме того, эта скорость также определяется относительным объемом ещё неосвоенной необходимой информации для применения полученных знаний при решении практических задач. Тогда процесс формирования умений и владений у студен-

тов можно описать следующим соотношением, характеризующем логистическую кривую научения (рис. 1, б):

$$(2) \quad y(t) = y_{\max} y_0 / (y_0 + (y_{\max} - y_0) \exp(-\alpha t)), \\ t \geq 0, \alpha > 0, y_{\max} > y_0.$$

В отличие от экспоненциальной логистическая кривая научения [9, 18] (см. рис. 1, б) характеризуется наличием начального пологого участка накопления учебной информации, после которого происходит резкое увеличение скорости усвоения информации.

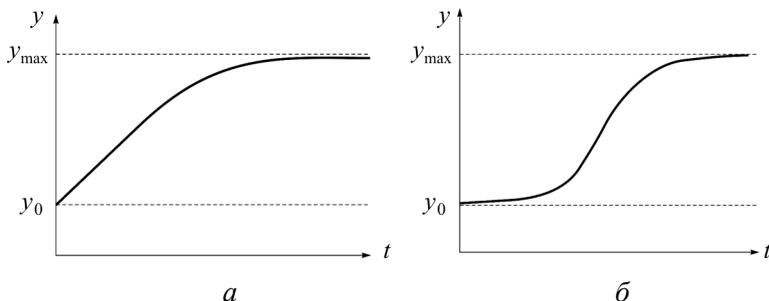


Рис. 1. Экспоненциальная и логистическая кривая научения

3. Автоматизированная информационная система оценивания

Внедрение разработанной методики невозможно без разработки автоматизированной информационной системы оценивания (АИСО) результатов образования [12]. Разрабатываемая система должна работать в масштабах всего вуза и предоставлять весь необходимый функционал для ведения компетентностных моделей выпускника и учебных планов по направлениям подготовки, разделения дисциплин на группы с возможностью определения параметров кривых научения для каждой компоненты компетенции (знать, уметь, владеть) во всех группах дисциплин, хранения и редактирования результатов прохождения студентами контрольных мероприятий в рамках промежуточных аттестаций, расчёта уровня сформированности дисциплинарных компетенций по каждому студенту, группе студентов,

направлению подготовки, факультету в любой момент времени, получения уровня сформированности каждой компетенции как интегрального результата освоения дисциплинарных компетенций и прохождения ИГА с учётом «веса» каждой оценки, по студенту, учебной группе, направлению подготовки, факультету.

Структурная модель прототипа АИСО включает следующие модули: модуль синхронизации данных с основной информационно-аналитической системой вуза, модуль, предоставляющий возможность экспертам определять параметры кривых научения по группам дисциплин, расчётный модуль комплексного оценивания уровня сформированности компетенции студента на определённый пользователем момент времени и модуль анализа и представления полученных результатов в виде отчетов, поступающих на кафедры и в систему менеджмента качества (СМК) вуза.

4. Результаты

Разработанный и реализованный в рамках работы прототип АИСО позволяет получать результаты образования в рамках дисциплинарных компетенций, групп дисциплин, компетенций, групп компетенций, на основании КМВ строить матрицу компетенций и формировать единый отчёт по освоению образовательной программы учебными группами студентов, включающий все вышеперечисленные пункты.

Кроме того, существует возможность отследить ход освоения компетенции для каждого студента на протяжении всего процесса обучения и оценить уровень сформированности компетенции в любой момент времени, как показано (рис. 2) для компетенции ПК-19, где верхний график соответствует максимально возможному уровню освоения компетенции, а нижний – уровню освоения компетенции студентом. Из графика видно, что в середине третьего семестра уровень освоения компетенции 2-го студента Y_2 составляет 121 час, в то время как максимально возможный уровень сформированности Y_{2M} составляет 132 часа, а это означает, что студент усвоил 92 % объёма информации, предоставленного в рамках формирования компетенции ПК-19 к середине третьего семестра.

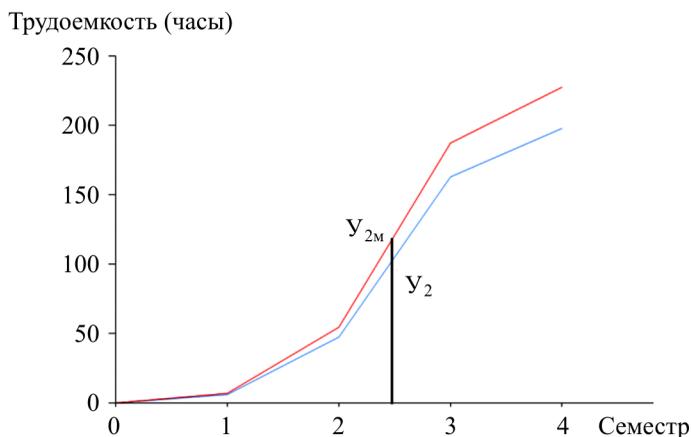


Рис. 2. График освоения компетенции ПК-19

Разработанный прототип АИСО позволяет в автоматизированном режиме оценивать уровень сформированности каждой заявленной компетенции, а также групп компетенций в процессе освоения студентами образовательной программы, что дает возможность обоснованно вырабатывать корректирующие воздействия на качество подготовки выпускников вуза.

5. Заключение

В ходе исследования разработаны математические модели описания нелинейных процессов накопления знаний, умений и владений в рамках формирования заявленных компетенций выпускника вуза. При этом предложено использовать кривые научения, параметры которых определяются экспертным путем в зависимости от содержания учебной дисциплины и применяемых технологий. На основании разработанной модели комплексного оценивания предложен алгоритм, позволяющий осуществлять оценку уровня сформированности компетенций на основании результатов текущего, рубежного, промежуточного контроля и государственной итоговой аттестации. Разработан прототип автоматизированной информационной системы оценивания системы образования, предоставляющий возможность хранения и изменения данных по контролю успеваемости сту-

дентов на различных этапах реализации образовательных программ, с учетом различных видов контрольных мероприятий. Разработанные модели и алгоритм комплексного оценивания, а также прототип автоматизированной информационной системы оценивания результатов образования апробированы в процессе контроля уровня сформированности компетенций студентов на ряде магистерских программ ПНИПУ. В ходе апробации были обоснованы параметры кривых научения для соответствующих учебных дисциплин и практических разделов реализуемых образовательных программ университета.

Литература

1. БРАГИНА А.А., ШИРЯЕВ В.И. *К вопросу обучения математике студентов технических факультетов университетов* // НАУКА СЕГОДНЯ: сб. науч. тр. по материалам международного науч.-практ. конф. / Научный центр «Диспут». – Пермь, 2014. – С. 14–17.
2. ГИТМАН Е.К., ГИТМАН М.Б., СТОЛБОВ В.Ю. *Подготовка специалистов для инновационной экономики: международный опыт и направления развития* // Актуальные проблемы экономики. – Киев, 2013. – № 143 (5). – С. 215–223.
3. ГИТМАН М.Б., ДАНИЛОВ А.Н., СТОЛБОВ В.Ю. *Об одном подходе к контролю уровня сформированности базовых компетенций выпускников вуза* // Высшее образование в России. – 2012. – № 4. – С. 13–18.
4. ГИТМАН М.Б., ДАНИЛОВ А.Н., СТОЛБОВ В.Ю. *Оценка уровня сформированности компетенций выпускника вуза* // Открытое образование. – 2014. – № 1. – С. 24–31.
5. *Критериальная модель оценки качества системы подготовки аспирантов с учетом уровня сформированности их профессиональных компетенций* / В.Ю. Столбов, М.Б. Гитман, Н.У. Венсовский, С.И. Пахомов // Регионология. – 2011. – № 3. – С. 181–186.
6. ЛИНДСЕЙ П., НОРМАН Д. *Переработка информации у человека (введение в психологию)*. – М.: Мир, 1974. – 550 с.

7. МИЦЕЛЬ А.А., ЧЕРНЯЕВА Н.В. *Анализ корреляции дисциплин учебного плана* // Инженерное образование. – 2016. – № 19. – С. 62–68.
8. *Модели сетевого взаимодействия вузов при подготовке кадров высшей квалификации* / М.Б. ГИТМАН, А.Н. ДАНИЛОВ, В.Ю. СТОЛБОВ, А.А. ЮЖАКОВ // Университетское управление: практика и анализ. – 2012. – № 3. – С. 69–73.
9. НОВИКОВ А.М. *Процесс и методы формирования трудовых умений: профпедагогика*. – М.: Высшая школа, 1986. – 288 с.
10. НОВИКОВ Д.А. *Закономерности итеративного научения*. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления РАН, 1998. – 77 с.
11. *Образовательные стандарты ПНИПУ: концепция разработки и опыт проектирования* / М.Б. ГИТМАН, А.Н. ДАНИЛОВ, Н.В. ЛОБОВ, В.Ю. СТОЛБОВ // Высшее образование в России. – 2014. – № 3. – С. 108–117.
12. ОВЧИННИКОВ А.А., ГИТМАН М.Б. *Автоматизированная система оценки уровня сформированности заявленных компетенций студента технического вуза* // Вестник Ижевск. гос. техн. ун-та им. М.Т. Калашникова. – 2016. – № 1. – С. 65–68.
13. *Оценка качества подготовки научных кадров к инновационной деятельности на основе процессного подхода* / М.Б. ГИТМАН, В.Ю. ПЕТРОВ, В.Ю. СТОЛБОВ, С.И. ПАХОМОВ // Университетское управление: практика и анализ. – 2011. – № 2. – С. 55–63.
14. ПОХОЛКОВ Ю.П. *Качество подготовки инженерных кадров глазами академического сообщества* // Инженерное образование. – 2014. – № 15. – С. 18–25.
15. ПОХОЛКОВ Ю.П., ГЕРАСИМОВ С.И. *Подготовка инженерных кадров, востребованных на рынке труда* // Транспортная стратегия – XXI век. – 2016. – № 33. – С. 68–69.
16. ПОХОЛКОВ Ю.П., РОЖКОВА С.В., ТОЛКАЧЕВА К.К. *Применение практико-ориентированных образовательных технологий при подготовке инженерных кадров** // Вестник Казан. технологич. ун-та. – 2013. – Т. 16. – № 16. – С. 56–59.
17. СУБЕТТО А.И. *Квалитология образования (основание и синтез)*. – М.: Изд-во Исследоват. центра проблем качества подготовки специалистов, 2000. – 220 с.

18. ХОВЛЕНД К. *Научение и сохранение заученного у человека* // Экспериментальная психология / под ред. С.С. Стивенса. – М.: ИЛ, 1963. – Т. II. – С. 124–223.
19. GUTHRIE E.R. *The psychology of learning*. – New York and London: Harper and Broth. Pub., 1935. – 258 p.

TECHNIQUE FOR ESTIMATION OF LEVEL OF DEVELOPMENT OF GRADUATE'S COMPETENCE

Alexander Ovchinnikov, Perm National Research Polytechnic University, postgraduate (alex.talking@mail.ru).

Abstract: This article discusses an approach to modeling the accumulation of internalized knowledge and acquired competencies through the learning curves. The proposed model is based on the approach to the measurement of internalized useful information during the training process and allows you to describe the logistic and iterative processes of acquiring knowledge, abilities and possessions, as the mandatory components of competencies stated within the confines of core competencies, implemented in high school educational programs. This model became the basis for estimating the level of competencies' completion, the results of which were tested on a number of educational programs in PNRPU.

Keywords: learning curves, negentropy, competence.

УДК 519
ББК 32.81

МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ИГРОКОВ В ДЕЛОВЫХ ИГРАХ С МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕХАНИЗМОМ ГРОВСА–ЛЕЙДЯРДА ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ОГРАНИЧЕННОГО РЕСУРСА

Кузнецова О.А.¹, Додонова Н.Л.², Глухов В.Н.³

*(Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королёва, Самара)*

В статье описывается процесс построения модели поведения агентов в игре с модифицированным механизмом Гровса–Лейдярда по распределению ограниченного ресурса. Модель строится на основе нечеткой логики, причем правила нечеткого вывода формируются на основе кластеризации данных большого количества проведенных игр.

Ключевые слова: механизмы распределения ресурсов, модели поведения игроков, нечеткая логика, кластеризация.

1. Введение

Одной из наиболее часто встречающихся проблем в экономике является проблема распределения ограниченного ресурса.

Решение проблемы можно найти с помощью использования теоретико-игровых моделей, исследованием которых занимаются многие российские и зарубежные ученые [1, 3, 8].

Важное место в разработке модели занимают следующие аспекты:

- разработка механизмов распределения;

¹ *Ольга Александровна Кузнецова, кандидат экономических наук (olga_5@list.ru).*

² *Наталья Леонидовна Додонова, кандидат физико-математических наук, доцент (ndodonova@bk.ru).*

³ *Вадим Николаевич Глухов, студент (headlaw96@gmail.com).*

- разработка моделей принятия решений игроками в условиях реализации различных механизмов распределения;
- разработка моделей поведения игроков для исследования и анализа различных механизмов распределения ресурса.

Для того чтобы определить эффективность различных механизмов, нужна модель поведения, описывающая действия агентов в зависимости от используемого механизма и обстановки окружающей среды. Среди популярных моделей поведения – доминирующие стратегии (если они существуют), байесовское равновесие и равновесие по Нэшу [2]. Поведенческая теория предлагает несколько основных моделей поведения, reinforcement learning (обучение с подкреплением) [9], обучение, основанное на вере (belief-based learning) [7], и их гибрид, опыт взвешенного обучения (Experience-weighted Attraction Learning) [6], а также Individual Evolutionary Learning [5].

В работе [4] предложена модель поведения, основанная на факторе рефлексии и нечётком логическом выводе. Сделано предположение, что данная модель будет отличаться при использовании разных механизмов в связи с особенностями функционирования каждого механизма (принцип распределения ресурсов, принцип начисления штрафов, если есть). Модель прошла экспериментальную апробацию для механизма обратных приоритетов.

Целью настоящей работы является разработка модели поведения игроков на основе нечеткой логики в играх с модифицированным механизмом Гровса–Лейдярда по распределению ограниченного ресурса.

Аналогичная модель реализована для игр с механизмом обратных приоритетов [4], однако в силу особенностей механизма распределения Гровса–Лейдярда адаптация этой модели в новых условиях является достаточно сложной самостоятельной задачей.

2. Модифицированный механизм Гровса–Лейдярда

2.1. ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА

Пусть R – объем распределяемого ресурса и $N = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество игроков.

Как и в работе [3], под механизмом будем понимать набор $\rho = \langle S, \pi, t \rangle$,

где $S = \left\{ s = (s_1, \dots, s_n) \mid \sum_{i \in N} s_i \leq R, s_i \in \mathbb{R}_+ \right\}$ – множество допустимых действий игроков;

$\pi: S \rightarrow A$ – некоторая процедура, сопоставляющая каждому допустимому действию игроков допустимое распределение ресурса;

$t: S \rightarrow \mathbb{R}^n$ – процедура трансфера полезностей.

Распределение осуществляет Центр, у которого имеется ограниченный ресурс R . Каждый из n игроков заинтересован в получении ресурса с целью извлечения прибыли, описываемой функцией полезности $u(x)$.

Если

$A = \left\{ x = (x_1, \dots, x_n) \mid \sum_{i \in N} x_i \leq R, x_i \in \mathbb{R}_+ \right\}$ – множество допустимых распределений ресурса,

$U = \{(u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)) \mid x_i \in \mathbb{R}_+\}$ – множество допустимых значений полезности, то задача распределения ресурса заключается в нахождении такого отображения

$$g: U \rightarrow A,$$

которое максимизирует суммарную прибыль

$$g(u) \in \mathop{\text{Arg max}}_{x \in A} \sum_{i \in N} u_i(x_i).$$

В ходе игры i -й агент выбирает действие $s = (s_{1i}, \dots, s_{ii}, \dots, s_{ni}) \in S$, где s_{ji} – заявка i -го игрока о количестве ресурса для j -го агента. Причем, сделав заявку для себя s_{ii} , остальные значения рассчитываются следующим образом [3].

На первой итерации:

$$s_{ji}^1 = \begin{cases} \frac{R - s_{ii}^1}{n - 1}, & \text{если } \sum_{i \in N} s_{ii}^1 > R \\ s_{ji}^1, & \text{если } \sum_{i \in N} s_{ii}^1 \leq R \end{cases}$$

Далее, на итерации τ :

$$s_{ji}^{\tau} = \begin{cases} x_{j-i}^{\tau-1}, & \text{если } s_{ii}^{\tau} + \sum_{j \in N \setminus \{i\}} x_{j-i}^{\tau-1} < R \\ x_{j-i}^{\tau-1} - \frac{1}{n-1} A_i, & \text{если } s_{ii}^{\tau} + \sum_{j \in N \setminus \{i\}} x_{j-i}^{\tau-1} \geq R \end{cases}$$

Здесь

$$x_{j-i} = \frac{1}{n-1} \sum_{k \in N \setminus \{i\}} s_{jk},$$

$$A_i = s_{ii} + \sum_{j \in N \setminus \{i\}} x_{j-i} - R$$

В соответствии с процедурой $\pi(s) = \{x_1(s), \dots, x_n(s)\}$ Центр распределяет ресурс, усредняя заявки всех игроков,

$$x_i(s) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_{ij}, i \in N$$

Трансферы игроков рассчитываются по формуле

$$t_i(s) = p_i(s) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j(s), i \in N,$$

где $p_i(s) = \beta \sum_{j=1}^n (x_j(s) - s_{ij})^2, i \in N$ – штраф за разногласие игроков,

коэффициент $\beta \geq 0$ – характеристика силы штрафа.

Выигрыш агента зависят от величины штрафа и на каждой итерации определяется по формуле

$$\varphi_i(s) = u_i(\pi(s)) - t_i(s).$$

Игра продолжается несколько шагов (количество итераций более 1).

2.2. ПРИМЕР ИГРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА

Игра по распределению ограниченного ресурса модифицированным механизмом Гровса–Лейдярда проводилась в разных по полу, возрасту, уровню образования и прочим характеристикам группах. Данные игр предоставлены авторами работы [3].

Пример фрагмента игры приведен в табл. 1, где s_1, s_2, s_3 – заявки первого, второго и третьего игроков соответственно; $x_1,$

x_2, x_3 – ресурс, получаемый игроками; p_1, p_2, p_3 – штрафы, назначаемые игрокам, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – выигрыши, первого, второго и третьего игроков соответственно.

В игре с данным механизмом нет явных рекомендаций. Основные правила:

- не делать резких изменений в заявках,
- большая прибыль может быть компенсирована большим штрафом за несоответствие заявки игрока величине полученного ресурса.

Таблица 1. Данные игры по распределению ограниченного ресурса механизмом Гровса–Лейдярда

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
s 1	49,00	49,00	47,00	25,00	24,00	22,00	62,00	21,00	21,00
s 2	41,00	70,00	60,00	50,00	80,00	100,00	80,00	55,00	55,00
s 3	25,00	35,00	35,00	64,00	60,00	60,00	60,00	45,00	55,00
x1	49,00	42,50	42,25	28,56	16,46	11,41	28,21	24,80	18,78
x2	41,00	49,00	48,38	43,36	52,12	62,77	51,67	52,17	50,17
x3	25,00	23,50	24,38	38,11	44,30	40,83	35,12	38,03	44,14
p1	0,00	-0,13	-0,06	-0,17	-0,22	-0,48	0,19	-0,03	-0,01
p2	0,00	0,16	0,01	-0,03	0,25	0,46	0,03	0,04	-0,03
p3	0,00	-0,03	0,05	0,20	-0,04	0,02	-0,22	-0,01	0,04
φ_1	7,07	6,72	6,64	5,61	4,40	4,00	5,22	5,11	4,46
φ_2	7,07	7,46	7,56	7,26	7,56	8,01	7,76	7,78	7,72
φ_3	7,07	6,99	6,98	7,75	8,36	8,10	7,97	7,95	8,28

Первые восемь шагов примера характеризуются скачкообразной динамикой в величине заявок агентов (рис. 1) и величине, полученной ими прибыли (рис. 2).

На первом шаге каждый игрок сделал заявку, соответствующую равновесной. На втором шаге первый игрок применил стратегию (модель поведения) «неизменная заявка», второй игрок сильно увеличил заявку, третий увеличил заявку, но не так сильно. В результате количество полученного ресурса для первого и третьего игроков уменьшилось, для второго – увеличилось (рис. 3).

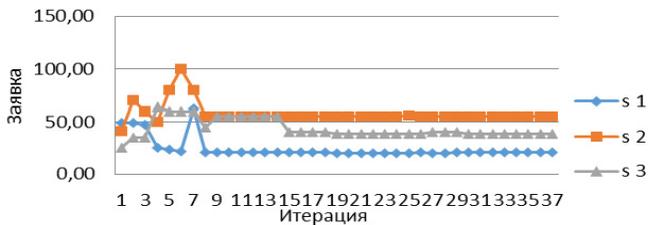


Рис. 1. Динамика заявок игроков

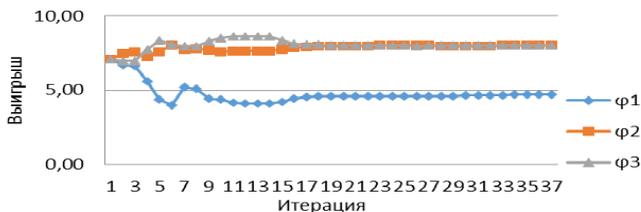


Рис. 2. Динамика выигрышей игроков

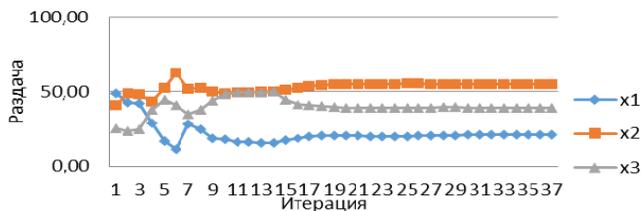


Рис. 3. Динамика ресурсов, полученных игроками

Первому и третьему игрокам были назначены штрафы, второй получил дополнительный доход (рис. 4).



Рис. 4. Динамика заявок игроков

В итоге выигрыш первого и третьего игроков уменьшился, у второго – увеличился.

На третьем шаге первый и второй игроки уменьшили свои заявки (немного – первый игрок, сильно – второй), третий игрок оставил заявку без изменений. Раздача ресурса оказалась немного меньше для первого и второго игроков и немного больше, для третьего игрока, чем на втором шаге. Прибыль при этом для второго игрока увеличилась и уменьшилась для первого и третьего игроков.

Неизменность заявок на втором, девятом и десятом шагах привела к уменьшению прибыли.

Небольшое уменьшение изменение заявки первого игрока на третьем, пятом и шестом шагах привело к уменьшению выигрыша первого игрока.

Увеличение заявки первого игрока в два-три раза на седьмом шаге, второго игрока на втором, третьем, пятом и шестом шагах, третьего игрока на четвертом и девятом шагах привело к увеличению прибыли игроков.

С десятого по тридцать седьмой шаг заявки изменяются незначительно и так же незначительно меняются выигрыши игроков. Таким образом, игра пришла к равновесию.

Известные модели поведения, применённые к этим данным, не полностью описывают поведение игроков.

Таким образом, учитывая наличие определённых закономерностей между поведением игроков и полученными результатами, описывающая их модель поведения определяет необходимость разработки новой модели поведения.

3. Модель поведения игроков

3.1. АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА

Модель поведения игроков в описанной выше игре построим на основе нечеткого логического вывода. Перечислим основные его этапы.

1. Формирование базы правил нечеткого вывода.
2. Фаззификация переменных (описание их функций принадлежности).
3. Агрегирование подусловий (определяется степень истинности условий по каждому правилу базы знаний).

4. Активизация заключений (определяется степень истинности заключения по каждому правилу базы знаний).

5. Аккумуляция заключений (объединение степеней истинности заключений всех правил базы знаний).

6. Дефаззификация (установление конкретного числового значения выходной переменной).

Пусть входные переменные описывают динамику изменения полученного игроком ресурса, динамику изменения полученного ресурса конкурентами, динамику изменения прибыли (выигрыша) игрока, динамику изменения прибыли (выигрыша) конкурентов. Выходная переменная рекомендует действие игроку (повысит, понизит или не изменять заявку) на следующем шаге.

Построив функции принадлежности и сформулировав базу знаний, можно будет не только прогнозировать действие игрока, но давать ему количественную характеристику – на сколько повысить (понизить) свою заявку.

3.2. ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ПРАВИЛ

Базу правил построим, проведя статистическую обработку результатов проведенных игр с тремя участниками.

Используя данные двух последовательных $(k - 1)$ -го и k -го шагов, определим динамику изменения распределения ресурса Δx_i и выигрышей $\Delta \varphi_i$ i -го игрока, а также динамику изменения обстановки ($\overline{\Delta x_{-i}}$ – изменение распределения ресурса игрокам $j \in N/\{i\}$, $\overline{\Delta \varphi_{-i}}$ – изменение выигрышей игроков $j \in N/\{i\}$). Выясним, какую заявку сделал i -й игрок на $(k + 1)$ -м шаге, оценим ее изменение Δs_i по сравнению с шагом k .

Поскольку динамика изменения может описываться лишь тремя значениями $\{\uparrow, \downarrow, 0\}$, получим не более $3^7 = 2187$ комбинаций, однако, учитывая ограниченность распределяемого ресурса, это число существенно снижается. Действительно, если для i -го игрока распределение ресурса увеличилось $\Delta x_i \neq \uparrow$, то для оставшихся двух игроков значение $\overline{\Delta x_{-i}} \neq \uparrow\uparrow$ и $\overline{\Delta x_{-i}} \neq 00$. Выигрыши же с учетом трансфера могут возрастать даже при уменьшении количества распределенного ресурса.

В табл. 2 приведены возможные варианты значений, описывающих динамику изменения распределения ресурса, выигрышей и заявок в игре для трех участников.

Таким образом, начиная с 3-го шага игры, для каждого игрока можем зафиксировать точку, описывающую одну из 972 сложившихся ситуаций:

$$\left(\Delta x_i, \overline{\Delta x_{-i}}, \Delta \varphi_i, \overline{\Delta \varphi_{-i}}, \Delta s_i \right).$$

Таблица 2. Динамика изменений распределения ресурса, выигрышей и заявок

Параметр	Варианты изменений		
Δx_i	↑	↓	0
$\overline{\Delta x_{-i}}$	↑↓, ↓↑, ↓↓, ↓0, 0↓	↑↑, ↑↓, ↑0, ↓↑, 0↑	↑↓, ↓↑
$\Delta \varphi_i$	↑, ↓, 0	↑, ↓, 0	↑, ↓, 0
$\overline{\Delta \varphi_{-i}}$	↑↑, ↑↓, ↑0, ↓↑, ↓↓, ↓0, 0↑, 0↓, 00	↑↑, ↑↓, ↑0, ↓↑, ↓↓, ↓0, 0↑, 0↓, 00	↑↑, ↑↓, ↑0, ↓↑, ↓↓, ↓0, 0↑, 0↓, 00
Δs_i	↑, ↓, 0	↑, ↓, 0	↑, ↓, 0

С целью выявления наиболее часто встречающихся ситуаций была проведена кластеризация по данным 23 игр.

В результате было выделено 5 наиболее значимых кластеров, каждый из которых включает более 35 элементов при максимальном количестве элементов в кластере – 60.

На рис. 5 приведены результаты кластеризации. По вертикали указано число элементов в кластере, по горизонтальной оси расположены кластеры в порядке возрастания количества элементов.

В табл. 3 приведено подробное описание выделенных кластеров.

В соответствии с полученными данными были сформулированы правила базы знаний.

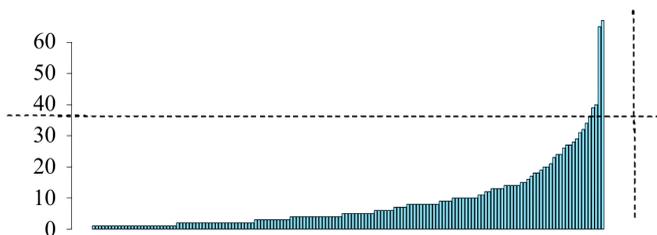


Рис. 5. Результаты кластеризации

Таблица 3. Описание кластеров

№ кластера	Параметры					Кол-во элементов
	Δx_i	$\overline{\Delta x_{-i}}$	$\Delta \phi_i$	$\overline{\Delta \phi_{-i}}$	Δs_i	
1	↓	↓↑	↓	↓↑	0	60
2	↑	↓↓	↑	↓↓	↓	45
3	↓	↑↑	↓	↑↑	↑	39
4	↑	↓↑	↑	↓↑	0	37
5	↑	↑↓	↓	↑↓	↑	36

3.3. ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Лингвистические переменные (ЛП), участвующие в нечетком логическом выводе, и их терм-множества приведены в табл. 4.

Таблица 4. Описание лингвистических переменных

Имя ЛП	Обозначение	Терм-множество
«объем распределенного ресурса игрока»	X_i	{повысился, понизился, не изменился}
«объем распределенного ресурса конкурентов»	X_{-i}	{повысился у всех, понизился у всех, повысился у одного и понизился у другого}
«объем выигрыша игрока»	Φ_i	{повысился, понизился, не изменился}
«объем выигрыша конкурентов»	Φ_{-i}	{повысился у всех, понизился у всех, повысился у одного и понизился у другого}
«объем заявки игрока на ресурс»	S_i	{повысить, понизить, не изменять}

Функции принадлежности составлены экспертным образом и носят дробно-линейный характер.

4. Результаты и выводы

На основе статистической информации по проведённым играм по распределению ограниченного ресурса модифицированным механизмом Гровса–Лейдярда [3] выявлены возможные параметры оценки окружающей среды и сформировано множество возможных обстановок окружающей среды.

Проведена кластеризация имеющихся данных, проведено ранжирование полученных результатов по частоте попадания в соответствующую группу (кластер).

Выбраны кластеры с наибольшей частотой попадания, и на их основе сформулированы правила поведения игроков.

Процесс построения модели носит универсальный характер и может быть реализован для произвольных механизмов распределения. Проверка эффективности разработанной модели составляет отдельную самостоятельную задачу и является темой дальнейших исследований авторов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-07-01550 А.

Литература

1. *Большие системы: Моделирование организационных механизмов* / В.Н. БУРКОВ, Б. ДАНЕВ, А.К. ЕНАЛЕЕВ [И ДР.]. – М.: Наука, 1989.
2. ЗАХАРОВ А.В. *Теория игр в общественных науках: учебник для вузов* / Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Изд. дом высш. школы экономики, 2015. – (Учебники Высшей школы экономики). – 304 с. – С. 22.
3. КОРГИН Н.А., КОРЕПАНОВ В.О. *Решение задачи эффективного распределения ресурсов на основе механизма Гровса–Лейдярда при трансферабельной полезности* // *Управление большими системами: сб. трудов.* – 2013. – № 46. – С. 216–266.
4. *Модель системы поддержки принятия решения с использованием нечёткой логики в деловых играх распределения ресурсов с нетрансферабельной полезностью* / М.В. ДОДО-

- НОВ, Н.Л. ДОДОНОВА, О.А. КУЗНЕЦОВА, А.А. ЕЛИСТРАТОВ // Управление большими системами: XIII Всерос. школа-конф. молод. ученых; 5–10 сентября 2016 г. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2016.
5. ARIFOVIC J., LEDYARD J. *A Behavioral Model for Mechanism Design: Individual Evolutionary Learning* // Journal of Economic Behavior & Organization. – 2010. – December 23.
 6. CAMERER C., TECK HUA HO. *Experience-weighted Attraction Learning in Normal Form Games* // Econometrica. – July 1999. – P. 827–874.
 7. FOX C.R., TVERSKY A. *A Belief-Based Account of Decision Under Uncertainty* // Management Science. – 1998.
 8. MOULIN H. *Honorary papers “Fair Division in the age of Internet”* // National Research University Higher School of Economics, XVII April International Academic Conference on Economic and Social Development, 19–22 April 2016.
 9. SUTTON R.S., BARTO A.G. *Reinforcement learning: an introduction*.

BEHAVIOR MODEL IN BUSINESS GAMES WITH THE MODIFIED MECHANISM OF GROVES-LAYDYARDA FOR LIMITED RESOURCES ALLOCATION

Olga Kuznetsova, Samara University, Samara, Cand.Sc., assistant professor, (Samara, Moscow Highway 34, 8(846)267-44-96, olga_5@list.ru).

Natalia Dodonova, Samara University, Samara, Cand.Sc., assistant professor, (ndodonova@bk.ru).

Vadim Glukhov, Samara University, Samara, student, (headlaw96@gmail.com).

Abstract: The article describes the process of constructing an agent behavior model in a game with a modified Groves-Leydard mechanism for the limited resource allocation. The model is built on the fuzzy logic basis and the fuzzy inference rules are formed on the basis of clustering the data of a large number of games played.

Keywords: resource allocation mechanisms, behavior models, fuzzy logic, clustering.

УДК 517.977.5

ББК 65.050.9(4Укр)030.1

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ФИНАНСОВОГО ЦИКЛА ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Гераськин М.И.¹, Егорова В.В.²

*(Самарский национальный исследовательский
университет им. академика С.П. Королева, Самара)*

*Разработана экономико-математическая модель оптимизации
финансового цикла, выбран состав критериев оптимальности,
сформирован комплекс ограничений, разработан алгоритм рас-
чета заказа ресурсов для минимизации длительности цикла.*

Ключевые слова: финансовый цикл, оптимизация по Парето, период оборота, дебиторская и кредиторская задолженности.

1. Введение

Проблема оптимизации производственной программы промышленного предприятия в условиях циклической динамики конъюнктуры спроса на рынках товаров и факторов актуальна и востребована в современных условиях. Особое значение эта проблема приобретает для промышленных предприятий, продукция которых выступает в качестве ресурсов производства товаров конечного потребления, т.е. спрос на продукцию которых является производным, что характерно для отрасли машиностроения. Основными количественными показателями циклической динамики производства является продолжительность финансового цикла, которая показывает степень эффективности использования оборотных средств предприятия, в связи с этим

¹ Михаил Иванович Гераськин, доктор экономических наук, профессор (innovation@ssau.ru).

² Виктория Викторовна Егорова, старший преподаватель (samara.egorova@mail.ru).

определение оптимального значения данного показателя представляется особенно важным.

2. Разработка оптимизационной модели финансового цикла

2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАКАЗОВ РЕСУРСОВ ПО КРИТЕРИЮ ФИНАНСОВОГО ЦИКЛА

Для расчета финансового цикла будем применять следующую математическую модель: рассматривается задача оптимального планирования производственных ресурсов в бизнес-процессе фирмы по критерию, характеризующему временную эффективность:

$$(1) \quad \min F_1(u),$$

где F_1 – длительность финансового цикла фирмы.

Матрица управления включает в себя объемы заказов (предъявлений требований к поставке или оплате) ресурсов на различных стадиях производственного процесса:

$$(2) \quad u = \{u_i^j, i = 1, \dots, 5, j = 1, \dots, J_i\}.$$

В качестве ресурсов исследуются такие виды (обозначены индексом i), как материалы, незавершенное производство (НЗП), готовая продукция, средства в расчетах, кредиторская задолженность, номенклатура которых обозначена индексом j .

Приведем базовую формулу финансового цикла:

$$(3) \quad F_1(u) = \frac{T}{C(u)} \sum_{i=1}^3 \bar{u}_i + \frac{T}{R(u)} \bar{u}_4 - \frac{T}{R(u)} \bar{u}_5,$$

где T – продолжительность периода (в днях); R, C – выручка и себестоимость продаж за период; \bar{u}_i – средние остатки ресурсов за период.

Средние остатки ресурсов за период определяются по формулам:

$$(4) \quad \bar{u}_i = \frac{u_i^0 + u_i^T}{2}, i = 1, \dots, 5.$$

С учетом соотношений балансов [1]

$$(5) \quad u_1 = u_1^T - u_1^0 + u_2,$$

$$(6) \quad u_2 = u_2^T - u_2^0 + u_3 - P,$$

$$(7) \quad u_3 = u_3^T - u_3^0 + C,$$

$$(8) \quad u_4 = u_4^T - u_4^0 + g,$$

$$(9) \quad u_5 = u_5^T - u_5^0 + d.$$

Средние остатки ресурсов определяются в виде

$$(10) \quad \bar{u}_1 = u_1^0 + \frac{u_1 + u_2}{2}, \quad \bar{u}_2 = u_2^0 + \frac{u_2 + P - u_3}{2}, \quad \bar{u}_3 = u_3^0 + \frac{u_3 - C}{2},$$

$$\bar{u}_4 = u_4^0 + \frac{u_4 - g}{2}, \quad \bar{u}_5 = u_5^0 + \frac{u_5 - d}{2},$$

где u_i, u_i^T – остатки ресурсов на конец периода T .

Полагаем средства в расчетах с дебиторами численно равными выручке фирмы за отгруженную продукцию:

$$(11) \quad R(u) = u_4.$$

Критерий эффективности определяется по формуле:

$$(12) \quad F_1(u) = \frac{T}{C(u)} \left(u_{\Sigma}^0 + \frac{u_1 + P(u) - C(u)}{2} \right) + \\ + \frac{T}{R(u)} \left(u_4^0 + \frac{R(u) - g(u)}{2} \right) - \frac{T}{R(u)} \left(u_5^0 + \frac{u_5 - d(u)}{2} \right),$$

где $u_i^0, i = 1, \dots, 5$ – остатки ресурсов (материалов, НЗП, готовой продукции, средств в расчетах, кредиторской задолженности соответственно) на начало периода; P – нематериальные производственные расходы за период (расходы на оплату труда, социальные отчисления, амортизация и прочие расходы); g – денежный поток от покупателей за период, т.е. погашенная дебиторская задолженность, d – погашенная кредиторская задолженность.

Поскольку выражение цикла (3) включает в себя в качестве аргумента в явном виде объем заказов материальных ресурсов u_1 , представим функции нематериальных расходов, издержек

и выручки также в зависимости от этого аргумента, что позволит свести задачу многомерной оптимизации (1) к оптимизации функций одной переменной u_1 . Для этого предположим наличие устойчивых взаимосвязанных трендов динамики объемов заказов на продукцию фирмы и объемов заказов ресурсов на различных стадиях производства в виде функций материалоемкости производства $P(u_1), P'_{u_1}(u_1) > 0$, материалоемкости выпуска продукции $C(u_1), C'_{u_1}(u_1) > 0$, материалоемкости отгруженной продукции $R(u_1), R'_{u_1}(u_1) > 0$, материалоемкости денежного потока $g(u_1), g'_{u_1}(u_1) > 0$ и материалоемкости кредиторской задолженности $d(u_1), d'_{u_1}(u_1) > 0$. Рассмотрим следующие модели этих трендов в виде степенных функций связи параметров управления и состояния фирмы:

$$(13) \quad P(u_1) = B_P u_1^{\beta_P}, B_P > 0, 0 < \beta_P < 2,$$

$$(14) \quad C(u_1) = B_C u_1^{\beta_C}, B_C > 0, 0 < \beta_C < 2,$$

$$(15) \quad R(u_1) = B_R u_1^{\beta_R}, B_R > 0, 0 < \beta_R < 2,$$

$$(16) \quad g(u_1) = B_g u_1^{\beta_g}, B_g > 0, 0 < \beta_g < 2,$$

$$(17) \quad d(u_1) = B_d u_1^{\beta_d}, B_d > 0, 0 < \beta_d < 2,$$

где $B_C, B_P, B_R, B_g, B_d, \beta_C, \beta_P, \beta_R, \beta_g, \beta_d$ – коэффициенты регрессионных моделей регрессионных моделей, ограничение $0 < \beta < 2$ наложено в связи с реальным характером эффекта расширения масштаба. Отметим, что функции (5)–(9) могут не отражать непосредственные регрессионные связи с аргументом u_1 , а формируются путем выявления наиболее коррелируемых из компонентов матрицы (2), а затем последовательного получения регрессий, как будет показано при моделировании.

Также предположим наличие убывающих трендов цен ресурсов, закупаемых фирмой $z_{j_1} = z_{j_1}(u_{1j_1}), j_1 = 1, \dots, J_1, z'_{j_1 u} < 0$, моделируемых в виде степенных функций:

$$(18) \quad z_{j_1}(u_{1j_1}) = A_{z_{j_1}} u_1^{\alpha_{z_{j_1}}}, \alpha_{z_{j_1}} < 0, j_1 = 1, \dots, J_1,$$

где $A_{z_{j_1}}, \alpha_{z_{j_1}}$ – коэффициенты регрессионных моделей цен ресурсов.

Учитываются следующие ограничения на управление [3].
Ограничение по нормативу потребности:

$$(19) \quad \begin{aligned} u_1^{\max}(N) &\geq u_1 \geq u_1^{\min}(N), \\ u_{1_{j_3}}^{\max(\min)} &= \sum_{j_1=1}^{J_1} \left[z_{j_1} \sum_{j_3=1}^{J_3} m_{j_1 j_3} \left(N_{j_3}^{\max(\min)} - u_{3_{j_3}}^0 - k_{j_3} \cdot u_{2_{j_3}}^0 \right) \right], \end{aligned}$$

где $m_{j_1 j_3}$ – массовый норматив расхода j_1 -го ресурса на производство единицы продукции j_3 -го типа; $N_{j_3}^{\max(\min)}$ – диапазон колебаний спроса на продукцию j_3 -го типа; k_{j_3} – коэффициент выхода готового изделия j_3 -го типа из НЗП; z_{j_1} – закупочная цена j_1 -го ресурса (за единицу массы).

Ограничение по предельному уровню заготовительных издержек

$$(20) \quad u_1 \geq u_1^{\min}(z),$$

обусловлено ростом цены ресурсов при снижении u_1 по тренду (18).

Сформулируем задачу оптимизации заказов ресурсов по временному критерию:

$$(19) \quad u_{1(t)}^* = \arg \min_{u_1 \in U} F_1(u_1),$$

с учетом ограничений:

$$(20) \quad U = \left\{ u_1 \in R^+ \mid u_1^{\max}(N) \geq u_1 \geq u_1^{\min}(N), u_1 \geq u_1^{\min}(z) \right\}, \quad (18)$$

где U – область допустимых значений u_1 .

2.2. ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ФИНАНСОВОГО ЦИКЛА

Построим механизм оптимизации для финансового цикла. Минимум финансового цикла (12) при трендах (13)–(17) достигается при неотрицательном значении аргумента $u_{1(t)}^* \geq 0$ и удовлетворяет условиям:

$$\begin{aligned}
 (21) \quad & -\beta_c \frac{u_\Sigma^0}{B_c} + \frac{1-\beta_c}{2B_c} u_{1F1}^* + \frac{B_p}{2B_c} (\beta_p - \beta_c) u_{1F1}^{*\beta_p} - \\
 & -\beta_R \frac{u_4^0}{B_R} u_{1F1}^{*-\beta_R+\beta_c} - \frac{B_g}{2B_R} (\beta_g - \beta_R) u_{1F1}^{*\beta_g-\beta_R+\beta_c} + \\
 & + \beta_R \frac{2u_5^0 + u_5}{B_R} u_{1F1}^{*-\beta_R-1} + \frac{B_d}{2B_R} (\beta_R - \beta_d) u_{1F1}^{*\beta_d-\beta_R-1} = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (22) \quad & u_{1F1}^* \in U_2 = \\
 & \left\{ \begin{array}{l} (\beta_g > \beta_R \cap \beta_g < \beta_R + 1) \forall u_{1F1}^*, \\ \beta_g \leq \beta_R \cap \phi(\beta_c, \beta_p, u_\Sigma^0, u_{1F1}^*) + \beta_R (\beta_R + 1) \frac{u_4^0}{B_R} u_{1F2}^{*-\beta_R-2} + \\ + \frac{B_g}{2B_R} (\beta_g - \beta_R) (\beta_R + 1 - \beta_g) u_{1F1}^{*\beta_g-\beta_R-2} > 0. \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

Сформируем модели (13)–(17) на основе ретроспективной информации о ежемесячной динамике технико-экономических показателей ООО «Роберт Бош Самара» за период 2015–2016 гг. Коэффициенты регрессионных моделей определены с помощью метода наименьших квадратов [2, 4]. Таким образом, были получены следующие модели:

$$(23) \quad P(u_1) = 29,43u_1^{0,119},$$

$$(24) \quad C(u_1) = 7,86u_1^{0,55},$$

$$(25) \quad R(u_1) = 0,38u_1^{1,084},$$

$$(26) \quad g(u_1) = 0,97u_1^{0,829},$$

$$(27) \quad d(u_1) = 24,29u_1^{0,122}.$$

Рассчитаем фактическую и прогнозную оптимальную длительность финансового цикла ООО «Роберт Бош Самара» на основе данных за 2016 г., отразим их на графике. Также на гра-

фике представим динамику изменения цикла в зависимости от объема заказов материалов (рисунок).

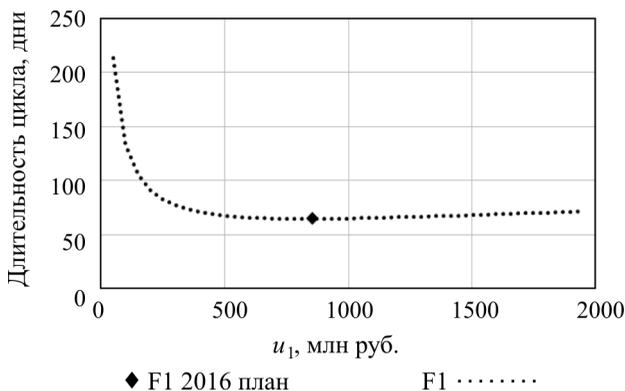


Рис. Динамика изменения производственного, операционного, финансового циклов и прибыли в зависимости от изменения объема заказов материальных ресурсов по данным регрессионного анализа для ООО «Роберт Бош Самара»

На графике отмечен расчетный минимум финансового цикла, а также его фактическое значение в 2016 г. Мы видим, что оптимальное значение цикла меньше фактического. Значение цикла предприятия уменьшается при росте аргумента u_1 , причем до отметки 200 млн руб. наблюдается резкий спад, затем до 400 млн руб. темп снижения замедляется, и в интервале 600–800 млн руб. мы видим оптимальное значение для финансового цикла, далее с ростом аргумента u_1 наблюдается медленный рост продолжительности цикла. Рассчитанный аналитическим методом экстремум совпадает с точкой минимума на графике, это значит, что расчет был проведен верно.

Литература

1. ГЕРАСЬКИН М.И., ЕГОРОВА В.В. *Оптимальные механизмы планирования позаказного производства по финансовым и временным критериям* // Управление большими системами. – 2015. – № 58. – С. 179–211.

2. ГОРЛАЧ Б.А., САВЕЛЬБЕВ Г.Л. *Прогнозирование и оптимизация процесса поставок в условиях колебания спроса* // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С.П. Королева (Нац. исслед. ун-та). – 2013. – № 4. – С. 48–57.
3. РОСТОВА Е.П., ВЕРХОВЕЦ О.А. *Постановка задачи линейного программирования для распределения средств по управлению рисками промышленного предприятия* // Вестник Омск. ун-та. Сер. Экономика. – 2013. – № 2. – С. 116–119.
4. СОКОЛОВ Я.В. *Основы теории бухгалтерского учета*. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 496 с.

ECONOMIC-MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION THE FINANCIAL CYCLE IN MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

Michail Geraskin, Samara National Research University, Samara, Doctor of Economics, professor (innovation@ssau.ru).

Victoriia Egorova, Samara State Aerospace University, Senior Lecturer of the Department of mathematical methods in Economics (samara.egorova@mail.ru).

Abstract: The problem of optimization of inventory in machine-building enterprises is considered. An economic-mathematical model for optimizing the financial cycle is developed, the composition of the optimal criteria is selected, a set of constraints is formed, an algorithm for calculating the order of resources is developed to minimize the cycle time.

Keywords: financial cycle, Pareto optimization, turnover period, accounts receivable and accounts payable.

УДК 519.86
ББК 22.162

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ИГРОКОВ В ДЕЛОВОЙ ИГРЕ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ РЕСУРСА В РЕЖИМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СППР ПО ЗАДАНЫМ МОДЕЛЯМ ПОВЕДЕНИЯ И БЕЗ НИХ

Кузнецова М.А.¹, Юдина С.В.²

*(Самарский национальный исследовательский
университет, Самара)*

В данной работе проведён анализ поведения агентов в ситуации с применением системы поддержки принятия решений и без неё. Игроки, а также система ориентированы на максимизацию индивидуальной целевой функции прибыли каждого отдельного агента, основополагающими принципами были приняты принципы нечеткой логики.

Ключевые слова: деловая игра, распределение ресурсов, система поддержки принятия решений, нечёткая логика, ограниченный ресурс.

Для студентов института экономики и управления была разработана деловая игра, позволяющая на практике исследовать механизмы распределения ограниченного ресурса в условиях неопределенности, для поддержки которой создан прототип приложения на базе Microsoft Excel, позволяющий студентам смоделировать работу рассматриваемых механизмов в динамике для изучения процесса достижения равновесия. Более подробно деловая игра и разработанный прототип описаны в работах «Разработка обучающего варианта деловой игры для исследования механизмов распределения заказа» [1] и «Разра-

¹ Марина Александровна Кузнецова, студентка, (mkuz195@mail.ru).

² Светлана Владимировна Юдина, студентка, (lana.yudina.95@mail.ru).

ботка программного инструмента для реализации и визуализации процесса достижения согласования интересов агентов при распределении ограниченного ресурса» [2].

В основе модели игры лежит уже готовая математическая модель стандартных механизмов распределения ограниченного ресурса, а именно модель распределения ресурса на основе механизма обратных приоритетов, данная матмодель представлена на экране.

В механизме обратных приоритетов распределение ресурса зависит от эффекта A_i использования ресурса x_i , полученного в зависимости от заявки S_i . Таким образом, механизм будет работать путем увеличения всех заявок на число γ , равное отношению количества ресурса, располагаемого центром, к суммарным эффектам использования ресурсов всех агентов.

Для поддержки данной игры разработано приложение, запустив его, игрокам необходимо ввести в i -й итерации свои заявки S , причем заявка не должна превышать объема ограниченного ресурса.

Затем будут происходить распределение ограниченных ресурсов путем уменьшения числа введённых заявок на число γ и расчет прибыли для каждого из агентов.

Далее, если выполняется условие, такое что три последовательно введённых заявки каждого из агентов являются одним и тем же числом, т.е. они одинаковы, то агенты добились равновесия, и дальнейшее изменение заявок не имеет смысла. Если условие постоянства заявок не выполняется, тогда агенты подают заявки заново с целью достижения равновесия и получения максимальной прибыли, итерация уже будет $i = i + 1$. Если в течении 10 итераций игроки так и не пришли к равновесию, игра считается завершенной.

Таким образом, приложение автоматизирует процесс решения задачи распределения ограниченного ресурса на основе механизма обратных приоритетов.

В данной игре для помощи в достижении равновесия в активной системе агентам предложены различные инструменты, позволяющие рассчитать оптимальное значение заявки для каждого агента:

◆ СППР с использованием нечёткой логики Н.Л. Додоновой и О.А. Кузнецовой;

◆ СППР на основе наилучшего ответа Коргина.

Целью данной работы является оценка доверия к данным инструментам расчёта оптимальной заявки.

Проведя эксперимент на трех малых группах, были получены данные, по которым были построены графики, изображенные на рис. 1–9.

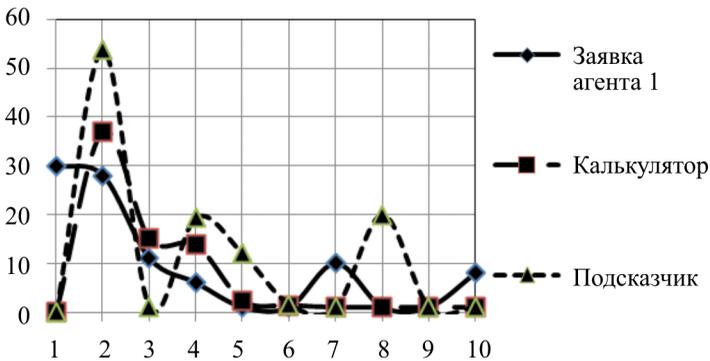


Рис. 1. Динамика распределенного ресурса в первой группе у 1-го агента

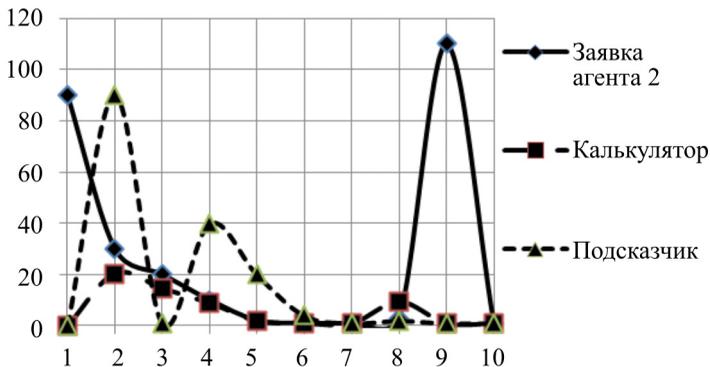


Рис. 2. Динамика распределенного ресурса в первой группе у 2-го агента

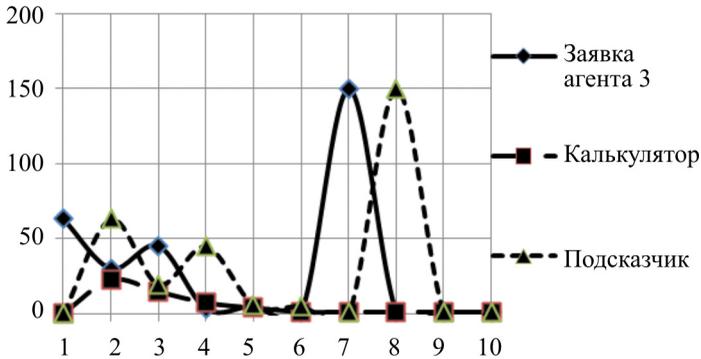


Рис. 3. Динамика распределенного ресурса в первой группе у 3-го агента

По графикам (см. рис. 1–3) видно, что 2-й и 3-й агент первой группы доверяют в большей степени калькулятору, что нельзя сказать об агенте 1, который полностью не доверяет ни одной программе и в большей степени рассчитывает на свои силы. В данной группе ни один агент не достиг равновесия.

На рис. 4–6 изображена динамика распределенного ресурса во второй группе.

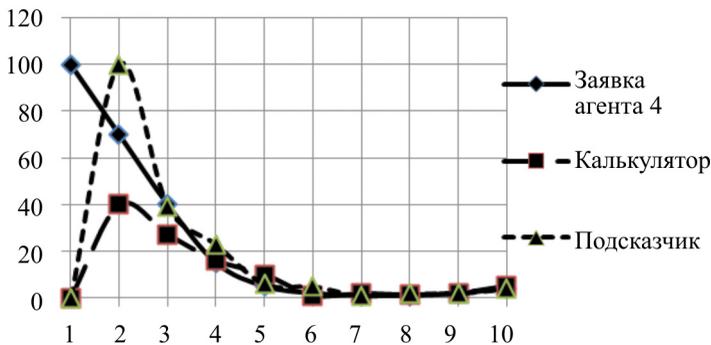


Рис. 4. Динамика распределенного ресурса во второй группе у 1-го агента

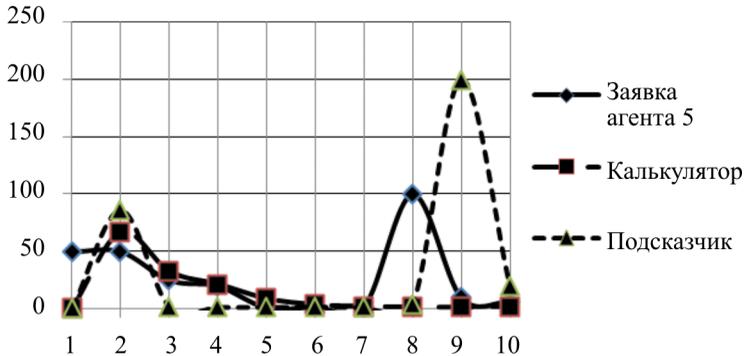


Рис. 5. Динамика распределенного ресурса во второй группе у 2-го агента

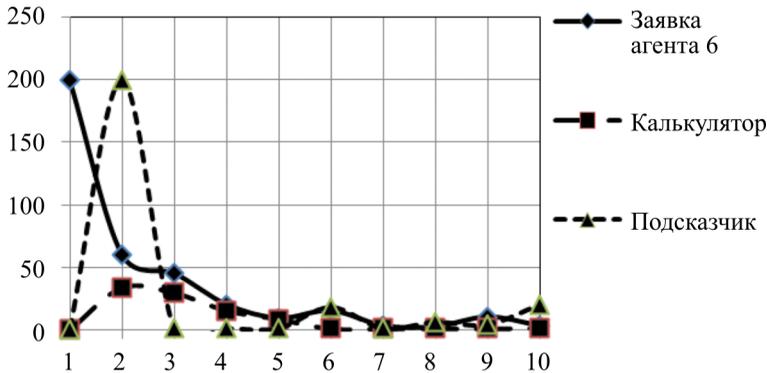


Рис. 6. Динамика распределенного ресурса во второй группе у 3-го агента

В группе 2 мы видим, что игроки не доверяют на каком-то шаге программам, но делают близкие значения, в отличие от агентов группы 1. В данной группе 4-й агент доверяет подсказчику на 30 %, что приводит его на 6-м шаге к равновесию, а агент 6 доверяет только калькулятору и всего на 10 %, но делает близкие значения, которые выдает программа и также приходит практически в равновесие на 7-м шаге, что нельзя сказать об агенте 5, который из-за недоверия к программам на протяжении всего эксперимента так и не пришел к оптимальной заявке.

На рис. 7–9 изображена динамика распределенного ресурса для третьей группы.

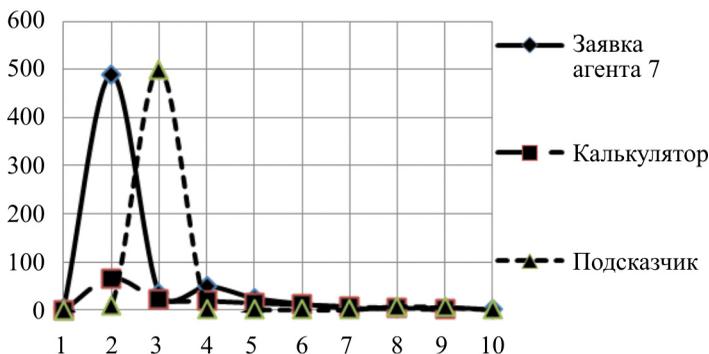


Рис. 7. Динамика распределенного ресурса в третьей группе у 1-го агента

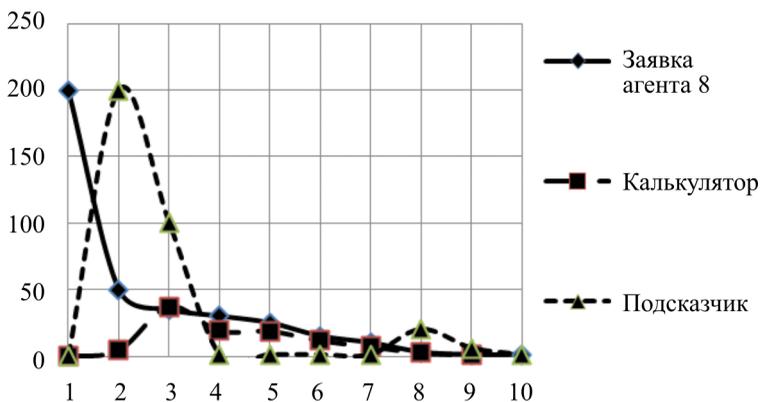


Рис. 8. Динамика распределенного ресурса в третьей группе у 2-го агента

По графикам группы 3 видно, что в основном агенты доверялись калькулятору, но все равно делали свои заявки, близкие по значениям, которые предлагала программа, что приводило их

более быстро к оптимальному значению заявки. По статистике в данной группе самая низкая степень доверия.

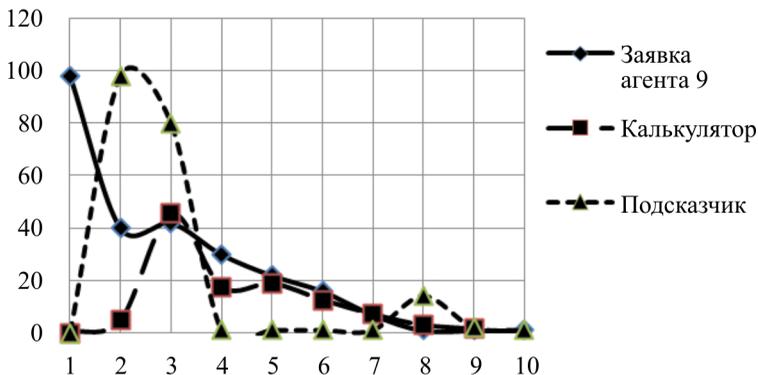


Рис. 9. Динамика распределенного ресурса в третьей группе у 3-го агента

По всем группам можно сделать вывод, что агенты не в полной мере следуют рекомендациям, а ставят заявки, приближенные к оптимальным.

По статистическим данным, собранным в ходе исследования поведения агентов, была построена гистограмма уровня доверия агентов к рекомендациям калькулятора и подсказчика, (рис. 10) по шкале от 0 до 1 (0 – нет доверия, т.е. агент не сделал ни одной заявки по рекомендации, 1 – полное доверие, то есть все заявки агента равны заявкам, рекомендуемым инструментами).

Как видно из данной гистограммы, ни один из агентов не доверился СППР более чем на 40 %, при этом наибольшее количество агентов (45 %) лишь единожды воспользовались калькулятором. Повторно игроки чаще обращались к советам подсказчика.

Анализируя поведение агентов, можно сделать вывод, что агенты, придерживающиеся заявок, предлагаемых СППР, достигают равновесного состояния раньше, чем агенты, делающие

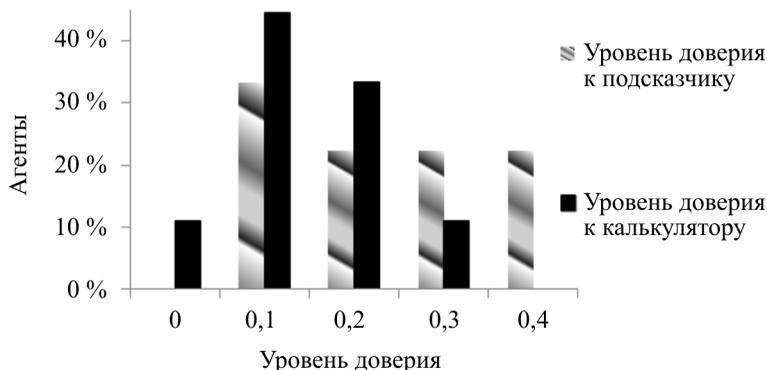


Рис. 10. Уровень доверия агентов к подсказчику и калькулятору

заявки самостоятельно, это происходит по причине того, что, действуя самостоятельно, агент высоковероятно выводит систему из равновесного состояния, намеренно искажая данные о необходимом количестве ресурса, что, в свою очередь, дестабилизирует других игроков. СППР, напротив, стремится привести агента к равновесному состоянию, и скачкообразное состояние в данном случае является лишь следствием от образовавшихся среди агентов условий.

Литература

1. *Разработка обучающего варианта деловой игры для исследования механизмов распределения заказа* / О.А. КУЗНЕЦОВА, Е.П. ДЕМЕНТЬЕВА, М.А. КУЗНЕЦОВА, С.В. ЮДИНА. – Самара, 2015.
2. *Разработка программного инструмента для реализации и визуализации процесса достижения согласования интересов агентов при распределении ограниченного ресурса* / О.А. КУЗНЕЦОВА, Е.П. ДЕМЕНТЬЕВА, М.А. КУЗНЕЦОВА, С.В. ЮДИНА. – Самара, 2015.

**THE ANALYSIS OF BEHAVIOUR OF PLAYERS
IN THE BUSINESS GAME ON DISTRIBUTION
OF THE RESOURCE IN THE MODES WITH USE OF SPPR
ON THE SET BEHAVIOR MODELS AND WITHOUT THEM**

Marina Kuznetsova, Samara National Research University of a name of the academician S.P. Korolev, Samara, student (mkuz195@mail.ru).

Svetlana Yudina, Samara National Research University of a name of the academician S.P. Korolev, Samara, student (lana.yudina.95@mail.ru).

Abstract: In this work the analysis of behavior of agents is carried out to situations with use of system of support of decision-making and without her. Players, and also system, are focused on maximizing individual criterion function of profit of each certain agent, the fundamental principles have accepted the principles of fuzzy logic.

Keywords: business game, distribution of resources, system of support of decision-making, fuzzy logic, limited resource.

УДК 004.896 + 004.023
ББК 32.965.7

УЧЕТ ПРИОРИТЕТОВ СТУДЕНТОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ УЧЕБНЫМИ ПЛАНАМИ СТУДЕНТОВ В УСЛОВИЯХ СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВУЗОВ

Чугунов А.П.¹

(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)

При построении индивидуальных учебных планов студентов, обучающихся по сетевой образовательной программе, часто возникает ситуация, когда удовлетворить желания всех студентов невозможно. В этом случае лицо, принимающее решения, осуществляет выбор итогового решения. Данная статья посвящена критериям такого выбора, одним из которых может быть учет приоритетов студентов, формируемый на основе его социального статуса и достижений.

Ключевые слова: индивидуальные учебные планы, сетевая образовательная программа, социальные категории студентов.

1. Введение

Федеральный закон от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» устанавливает возможность реализации образовательных программ в сетевой форме.

В законе под сетевой формой реализации образовательных программ понимается организация обучения с использованием ресурсов нескольких организаций, осуществляющих образовательную деятельность, в том числе иностранных, а также при необходимости с использованием ресурсов иных организаций [2].

¹ Александр Петрович Чугунов, аспирант (ap.chuginov@gmail.com).

Сетевая форма реализации не является обязательной и может применяться вузами для обеспечения необходимого уровня подготовки выпускников. Можно выделить следующие преимущества вузов при применении сетевой формы для реализации образовательных программ, в частности [1]:

- ◆ повышение качества образования за счет аккумуляции лучшего опыта ведущих зарубежных и отечественных образовательных организаций;
- ◆ развитие личностных качеств, компетенций устной и письменной коммуникации студентов;
- ◆ расширение границ информированности обучающихся об имеющихся образовательных и иных ресурсах;
- ◆ повышение эффективности и качества образовательных программ;
- ◆ развитие обмена передовым опытом подготовки кадров между различными образовательными организациями.

Особое место в вопросах организации сетевой формы взаимодействия вузов уделяется вопросам управления индивидуальными учебными планами (ИУП) студентов [3] в рамках реализации сетевых образовательных программ, однако они до сих пор не решены [6].

Задача нахождения оптимальных ИУП студентов относится к классу *np*-сложных задач дискретной оптимизации, и огромное количество допустимых решений на реальных примерах не позволяет применять метод полного перебора. Для её решения был успешно применен эвристический метод, в основе которого находятся генетические алгоритмы и который подробно описан в [5].

Одной из сложностей построения совокупности ИУП студентов является возможность студентов выбрать вузы таким образом, что удовлетворение всех их желаний приведет к нарушению ограничений, наложенных вузами. В этом случае итоговое решение полностью удовлетворит лишь часть студентов – остальные же будут удовлетворены в меньшей степени.

В данной статье этот алгоритм будет рассмотрен с точки зрения учета приоритетов студентов на примере решения задачи построения ИУП студентов, обучающихся в международной магистратуре «Обеспечение технологических процессов жиз-

ненного цикла изделия», в рамках международного проекта «Успех» («Success») (544019-TEMPUS-1-2013-1-ATTEMPUS-JPCR), проектирование согласованного учебного плана которой приведено в [4].

2. Задача построения индивидуальных учебных планов

2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Условия данной задачи можно сформулировать следующим образом. Пусть сетевую магистерскую программу реализуют 4 вуза: ВУ31, ВУ32, ВУ33, ВУ34. Сама сетевая программа состоит из 4 модулей, каждый из которых имеет трудоемкость 30 зачетных единиц и реализуется в течение одного семестра. По договоренности между вузами в рамках данной сетевой программы студенты могут пройти только один – третий по счету модуль в любом вузе-партнере, остальные модули должны быть изучены в базовом вузе.

Считается, что каждый вуз набрал по 10 студентов. Таким образом, общее количество студентов, обучающихся на сетевой программе, – 40 человек, каждый из которых должен изучить 1 модуль в другом вузе (третий по счету). Каждый вуз установил ограничения на количество студентов, которые в нем могут изучать согласованный учебный модуль: от 8 до 12. Каждый студент определил свои предпочтения по изучению модуля в каждом из вузов. Данные предпочтения представлены в табл. 1, где 1 соответствует наибольшему желанию студента изучить модуль в вузе, а 0 – наименьшему.

Таблица 1. Предпочтения студентов

Студент	Базовый вуз	Приоритет студента	ВУ31	ВУ32	ВУ33	ВУ34
1	ВУ31	2	–	0,6	0,1	0,1
2	ВУ31	2	–	0,8	0,6	0,3
3	ВУ31	2	–	0,5	0,6	0,6
4	ВУ31	2	–	0,4	0,3	0,5
5	ВУ31	2	–	0,1	0,2	0,7
6	ВУ31	2	–	0,3	0,5	0,4

Окончание табл. 1

Студент	Базовый вуз	Приоритет студента	ВУ31	ВУ32	ВУ33	ВУ34
7	ВУ31	2	–	0,6	0,2	0,3
8	ВУ31	2	–	0,2	0,4	0,6
9	ВУ31	2	–	0,6	0,6	0,5
10	ВУ31	2	–	0,5	0,7	0,4
11	ВУ32	1	1	–	0,6	0,1
12	ВУ32	2	1	–	0,8	0,6
13	ВУ32	1	1	–	0,5	0,6
14	ВУ32	2	1	–	0,4	0,3
15	ВУ32	2	1	–	0,1	0,2
16	ВУ32	2	1	–	0,3	0,5
17	ВУ32	2	1	–	0,6	0,2
18	ВУ32	2	1	–	0,2	0,4
19	ВУ32	2	1	–	0,6	0,6
20	ВУ32	2	1	–	0,5	0,7
21	ВУ33	2	1	0,6	–	0,1
22	ВУ33	2	1	0,8	–	0,6
23	ВУ33	2	1	0,5	–	0,6
24	ВУ33	2	1	0,4	–	0,3
25	ВУ33	2	1	0,1	–	0,2
26	ВУ33	2	1	0,3	–	0,5
27	ВУ33	2	1	0,6	–	0,2
28	ВУ33	2	1	0,2	–	0,4
29	ВУ33	2	1	0,6	–	0,6
30	ВУ33	2	1	0,5	–	0,7
31	ВУ34	2	1	0,6	0,1	–
32	ВУ34	2	1	0,8	0,6	–
33	ВУ34	2	1	0,5	0,6	–
34	ВУ34	2	1	0,4	0,3	–
35	ВУ34	2	1	0,1	0,2	–
36	ВУ34	2	1	0,3	0,5	–
37	ВУ34	2	1	0,6	0,2	–
38	ВУ34	2	1	0,2	0,4	–
39	ВУ34	1	1	0,6	0,6	–
40	ВУ34	2	1	0,5	0,7	–

Поскольку прохождение одного модуля в другом вузе является обязательным условием рассматриваемой программы, желания изучения модуля в собственном, базовом вузе не собирались и в соответствующих ячейках в табл. 1 проставлены «—».

В таблице также отражен приоритет студента. Желания студентов с меньшим приоритетом должны быть удовлетворены в первую очередь. В каждой конкретной ситуации определение приоритета студента может осуществляться по-своему или всем студентам может быть присвоен один приоритет – тогда студенты будут считаться равными. При определении приоритета могут учитываться академические, научные, спортивные успехи студента, его социальный статус или любые другие признаки. В нашем случае у трёх студентов (11, 13, 39) задан приоритет 1, у остальных – 2. Таким образом, студенты 11, 13 и 39 обладают более высоким приоритетом при учете предпочтений.

Требуется найти такое распределение студентов по вузам для изучения третьего модуля, которое бы удовлетворяло следующим ограничениям:

- ♦ выполняются ограничения каждого вуза на количество студентов, изучающих этот модуль в его стенах;

- ♦ минимум удовлетворенности студентов с первым приоритетом был максимален;

и при котором медиана их удовлетворенности (соответствующий коэффициент из таблицы) была бы максимальной. При этом считается, что в индивидуальном учебном плане каждого студента первый, второй и четвертый модули сетевой образовательной программы должны быть изучены в базовом для студента вузе (в который он поступил), а третий должен быть изучен в другом вузе-партнере.

Удовлетворенность одного s -го студента совокупностью ИУП P представляется в виде вектора принадлежности выбранных вузов нечетким множествам «желаемый вуз изучения s -студентом m -модуля» $(\mu_{s1}(P_{s1}), \dots, \mu_{sm}(P_{sm}))$, где $\mu_{sm}(n)$ – функция принадлежности, задаваемая самим студентом, а P_{sm} – номер вуза, в котором s студент изучает m -й по счету модуль. Для оценки удовлетворенности студента будем использовать медиану такого вектора: $W_S = Me(\mu_{s1}(P_{s1}), \dots, \mu_{sm}(P_{sm}))$.

2.2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Существует множество допустимых решений поставленной задачи. В случае отсутствия потребности учета приоритетов студентов задача может быть решена с необходимой точностью за приемлемое время эвристическим алгоритмом, в основе которого лежит генетический алгоритм [5].

В случае же необходимости учета приоритетов студентов с целью повышения уровня справедливости их распределения по вузам данный алгоритм не применим, так как в нем отсутствует такая возможность. Однако существует возможность его модификации с целью получения этой возможности.

Суть модификации заключается в итерационном применении первоначального алгоритма. Для этого:

- ◆ все студенты разбиваются на группы в соответствии с их приоритетами (студенты с приоритетом 1, с приоритетом 2 и т.д.);

- ◆ для каждой группы в порядке убывания их важности (вначале приоритет 1, потом 2 и т.д.):

- актуализировать ограничения вузов в соответствии с уже занятыми местами (на первой итерации берутся изначально заданные ограничения вузов);

- осуществить распределение студентов эвристическим алгоритмом, используя в качестве параметров запуска студентов только текущей группы и вычисленные ограничения вузов.

Таким образом, студенты с наибольшим приоритетом будут распределены в первую очередь, а запуск алгоритма с меньшим количеством студентов существенно сокращает количество возможных решений, что позволяет повысить точность решения или даже применить метод полного перебора для нахождения решения с максимальным значением целевой функции.

Одно из возможных решений, полученное описанным способом, представлено в табл. 2.

В полученном решении значение целевой функции также равно 0,7. Точность решения при этом равна 100 %, и желания всех студентов с первым приоритетом удовлетворены.

Таблица 2. Решение задачи

Студент	Базовый вуз	Выбранный вуз, коэффициент удовлетворенности студента и уровень выбранного вуза в предпочтениях студента
1	ВУ31	ВУ32 (0,6) – 1
2	ВУ31	ВУ32 (0,8) – 1
3	ВУ31	ВУ34 (0,6) – 1
4	ВУ31	ВУ34 (0,5) – 1
5	ВУ31	ВУ34 (0,7) – 1
6	ВУ31	ВУ33 (0,5) – 1
7	ВУ31	ВУ32 (0,6) – 1
8	ВУ31	ВУ34 (0,6) – 1
9	ВУ31	ВУ32 (0,6) – 1
10	ВУ31	ВУ33 (0,7) – 1
11	ВУ32	ВУ31 (1) – 1
12	ВУ32	ВУ33 (0,8) – 2
13	ВУ32	ВУ31 (1) – 1
14	ВУ32	ВУ31 (1) – 1
15	ВУ32	ВУ31 (1) – 1
16	ВУ32	ВУ34 (0,5) – 2
17	ВУ32	ВУ33 (0,6) – 2
18	ВУ32	ВУ31 (1) – 1
19	ВУ32	ВУ33 (0,6) – 2
20	ВУ32	ВУ34 (0,7) – 2
21	ВУ33	ВУ32 (0,6) – 2
22	ВУ33	ВУ32 (0,8) – 2
23	ВУ33	ВУ34 (0,6) – 2
24	ВУ33	ВУ31 (1) – 1
25	ВУ33	ВУ31 (1) – 1
26	ВУ33	ВУ33 (0,5) – 2
27	ВУ33	ВУ32 (0,6) – 2
28	ВУ33	ВУ31 (1) – 1
29	ВУ33	ВУ34 (0,6) – 2
30	ВУ33	ВУ34 (0,7) – 2
31	ВУ34	ВУ32 (0,6) – 2
32	ВУ34	ВУ32 (0,8) – 2
33	ВУ34	ВУ33 (0,6) – 2

Окончание табл. 2

Студент	Базовый вуз	Выбранный вуз, коэффициент удовлетворенности студента и уровень выбранного вуза в предпочтениях студента
34	ВУЗ4	ВУЗ1 (1) – 1
35	ВУЗ4	ВУЗ1 (1) – 1
36	ВУЗ4	ВУЗ1 (1) – 1
37	ВУЗ4	ВУЗ2 (0,6) – 2
38	ВУЗ4	ВУЗ3 (0,6) – 2
39	ВУЗ4	ВУЗ1 (1) – 1
40	ВУЗ4	ВУЗ3 (0,7) – 2

3. Заключение

Почти любая задача составления индивидуальных учебных планов студентов, обучающихся по сетевой образовательной программе, имеет множество возможных решений. Такая ситуация дает возможность выбора из множества оптимальных решений, полученных с помощью генетического алгоритма, необходимого для распределения студентов лицом, принимающим решения (ЛПР).

При этом ЛПР при построении решения может учитывать дополнительные приоритеты студентов, например, их успехи в обучении в базовом вузе, материальные возможности студентов и т.п. Такой подход делает полученное решение более «справедливым» и максимально учитывает предпочтения студентов.

Литература

1. ВЕРЕЦАГИНА Н.О., ХАРИТОНОВА О.В. *Сетевое взаимодействие Герценовского университета: от разработки к реализации* // Современный университет: теория и практика. – 2013. – № 4. – С. 13–22.
2. ЗАСЕДАТЕЛЬ В.С., ЛОЩИЛОВА М.А. Особенности сетевого взаимодействия в образовательном процессе технического вуза // Развитие единой образовательной информационной среды: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2015. – С. 99–103.

3. КИРИЕНКОВА Н.В., СВИРИДОВ А.Н. *Индивидуальный образовательный маршрут в системе психолого-педагогического сопровождения студентов вуза // Мир науки, культуры, образования. – 2015. – № 2 (51). – С. 10–13.*
4. ЛОБОВ Н.В., СТОЛБОВ В.Ю., ГИТМАН М.Б. *Сетевое взаимодействие вузов: методика проектирования совместных образовательных программ // Высшее образование сегодня. – 2014. – № 5. – С. 40–45.*
5. ЧУГУНОВ А.П., СТОЛБОВ В.Ю. *Применение генетического алгоритма поддержки принятия решений при управлении индивидуальными учебными планами студентов // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 5. – URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36687> (дата обращения: 20.06.2017).*
6. ЧУГУНОВ А.П., СТОЛБОВ В.Ю. *Управление взаимодействием вузов при реализации сетевых образовательных программ // Университетское управление: практика и анализ. – 2014. – № 3(91). – С. 126–132.*

TAKING INTO ACCOUNT STUDENTS CATEGORIES FOR PERSONAL STUDENT ACADEMIC PLANS MANAGEMENT IN UNIVERSITY COOPERATION PROBLEM

Alexander Chugunov, Perm National Research Polytechnic University, Perm, postgraduate student (ap.chugunov@gmail.com).

Abstract: There are often situations in personal student academic plans in university cooperation contracting when all student wishes can't be satisfied. Decision maker chooses a final solution in that case. The article contains solution choice criteria description, including student priority, which is based on student social status, student achievements etc.

Keywords: personal student academic plans, university cooperation, social categories of students.

УДК 331.103.34.
ББК 65.24+65.290-2

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ
КОЛИЧЕСТВЕННО-КАЧЕСТВЕННЫМ СОСТАВОМ
СПЕЦИАЛИСТОВ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ
ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА РАЗДЕЛЬНЫЙ
СЕРВИС ПРИ БУРЕНИИ**

Гуреева Е.Г.¹

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Гуреев К.А.²

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь,
Негосударственное образовательное учреждение
высшего образования «Московский технологический
институт», Москва)*

В статье представлена разработка расчётной модели определения количественно-качественного состава специалистов службы заказчика при переходе на систему раздельного сервиса при бурении скважин, практически реализованная на предприятии по добыче нефти и газа. Показаны направления развития форм и методов организации производства и сбыта продукции на нефтедобывающих предприятиях. Сформулированы традиционные и частные принципы, использованные в разработанной модели. Выделены факторы, влияющие на трудоёмкость работ и численность специалистов службы заказчика при переходе на раздельный сервис при бурении скважин.

Ключевые слова: нефтедобывающие предприятия, бурение скважин, раздельный сервис, расчётная модель, управленческие решения, количественно-качественный состав.

¹ Елена Григорьевна Гуреева, кандидат экономических наук, доцент (egliman@mail.ru).

² Кирилл Александрович Гуреев, кандидат экономических наук, доцент (gureev.prof@gmail.com).

1. Введение

Обострение рыночной конкуренции и нестабильность, обусловленная известными политическими и экономическими проблемами на рынках добычи нефти и газа, объективно способствуют поиску новых форм и методов организации производства и сбыта продукции. К таким формам можно отнести все более широкое использование услуг посреднических фирм на принципах аутсорсинга при организации добычи нефти и газа. Привлечение для выполнения многих производственных процессов узкоспециализированных сервисных компаний, имеющих большой опыт, обеспечивает улучшение качества работ и снижение затрат на добычу нефти и газа.

Дальнейшее развитие форм и методов организации производства и сбыта нефти и газа проявляется в применении системы раздельного сервиса, в том числе и в процессе бурения. В этом случае, в отличие от Генерального подряда «под ключ» и Интегрированного управления проектами, происходит привлечение большего числа независимых подрядчиков для осуществления разных стадий процесса строительства скважин с более глубоким разделением по видам услуг.

Следует уточнить положительные и отрицательные стороны форм организации строительства скважин для заказчика (таблица). Как видно, из отрицательных сторон (выделенный квадрант) при раздельной форме бурения необходимо создание серьезной службы заказчика, которая будет полностью управлять всеми процессами. Заказчику приходится брать на себя целый ряд управляющих и координационных функций, поэтому увеличивается нагрузка, расширяется круг задач, усложняется иерархическая структура управляющего звена заказчика.

При недостаточном внимании к организации деятельности можно получить неблагоприятную тенденцию – количество специалистов в службе заказчика будет непрерывно расти, а следовательно, будут увеличиваться постоянные издержки. Проявляется необходимость повышения качества управления службой заказчика, в том числе организационно-технического

Сравнение форм организации строительства скважин: плюсы и минусы для заказчика

	Генеральный подряд	Интегрированное управление проектами	Раздельный сервис
Плюсы	<p>Заказчику нет необходимости вмешиваться в ход строительства скважин.</p> <p>В штате заказчика минимальное число сотрудников.</p> <p>Большая часть рисков, возникающих при строительстве, ложится на генподрядчика.</p> <p>Предсказуемая итоговая стоимость работ.</p> <p>Мотивация подрядчика на ускорение работ.</p>	<p>Заказчику нет необходимости вмешиваться в ход строительства скважин.</p> <p>В штате заказчика минимальное число сотрудников.</p> <p>Гибкость в конфигурации проектной команды (с учетом спецификации работ).</p>	<p>Заказчик полностью контролирует процесс строительства скважин и качество выполнения работ.</p> <p>Заказчик самостоятельно выбирает и ставит требования по качеству и стоимости работ сервисов.</p> <p>Отсутствуют наценки, характерные для других типов взаимодействия.</p> <p>Возможность привлечения опытных специалистов с учетом потребности конкретного проекта.</p>
Минусы	<p>Более высокая стоимость работ, выставляемая генподрядчиком, включающая накладные и управленческие затраты генподрядчика, а также его прибыль.</p> <p>Сложность контроля качества всех работ.</p> <p>Повышенные риски по качеству, срокам и стоимости при</p>	<p>Более высокая стоимость работ, выставляемая подрядчиком по ИУП, включающая его накладные и управленческие затраты, а также его прибыль.</p> <p>Значительная часть рисков ложится на заказчика (в российской практике).</p> <p>Менее предсказуемая итоговая стоимость</p>	<p>Почти все риски ложатся на заказчика.</p> <p>Необходимость иметь в штате компании большого количества высокооплачиваемых сотрудников.</p> <p>Малопредсказуемая итоговая стоимость работ.</p> <p>Относительная неразвитость в России рынка опытных специалистов по управ-</p>

Окончание таблицы

	Генеральный подряд	Интегрированное управление проектами	Раздельный сервис
	отсутствии у ген-подрядчика необходимого опыта (тип скважин, регион работ). Ограниченное влияние заказчика на процесс строительства.	работ, чем при ген-подряде. Неразвитость рынка услуг ИУП в России.	лению проектами бурения скважин. Высокая стоимость этих специалистов. Низкая мотивация подрядчиков на ускорение работ.

уровня выполнения работ специалистами и контроль их численности. Данная проблема значительно упрощается, если на предприятии прописаны бизнес-процессы не только на уровне процессов верхнего уровня (БПВУ) и элементарных процессов (ЭлБП), но и существует детализация бизнес-функций (БФ).

Изучение научных источников показало, что вопросам процессного управления специалисты уделяют достаточно много внимания. Можно выделить работы таких зарубежных авторов, как Д. Харрингтона, К.С. Эсселинга, Х. Нимвегена, А. Бьёрна, М. Робсона, и других. Также известны отечественные специалисты: В.Г. Елиферов, В.В. Репин, В.С. Иванов, С.В. Сухов. Я.М. Гританс, Г.Г. Исаев и другие.

Однако в изученных работах недостаточно уделяется внимания разработке прикладных инструментов, необходимых для поддержки управленческих решений в задачах оптимизации количественно-качественного состава специалистов на основе измерения трудоёмкости, оптимизации бизнес-процессов «снизу-вверх» при активном участии специалистов-исполнителей. Однако именно такие инструменты позволяют проводить обоснования необходимых решений по совершенствованию организационно-технического уровня выполняемых работ специалистами, контроль затрат на содержание службы заказчика и другие управленческие решения, направленные на повышение экономических показателей деятельности предприятия в целом.

Цель данной статьи – описать разработку расчётной модели определения количественно-качественного состава специалистов службы заказчика при переходе на систему раздельного сервиса (при условии применения бизнес-процессного управления), практически реализованную на предприятии по добыче нефти и газа.

2. Традиционные и специальные принципы

Расчётная модель разрабатывалась на основе сформулированных принципов по определению подходов к формированию количественно-квалификационного состава служб заказчика по бурению для выполнения работ в рамках раздельного сервиса. Использовались, как традиционные, так и специальные (частные) принципы.

К традиционным можно отнести:

1) **комплексность** – сущность принципа заключается в том, что при установлении норм труда учитывался комплекс производственных (технических, организационных, плановых), а также связанных с удовлетворением интересов работников в процессе труда (физиологических, социальных и других) факторов;

2) **системность** – нормы труда устанавливались с учетом конечных результатов и зависимости затрат труда на рабочих местах от издержек;

3) **эффективность** – устанавливались такие нормы, при которых в нормальных условиях труда требуемый результат деятельности достигается с минимальными суммарными затратами ресурсов;

4) **прогрессивность** – при расчете норм труда исходили из передовых научно-технических и производственных достижений, применяемых на рабочих местах, в целях экономии затрат живого и овеществленного труда и улучшения его условий;

5) **конкретность** – нормы труда устанавливались в соответствии с параметрами работ, предметов и средств труда, его условиями, сложностью, масштабами производства и другими

характеристиками, определяющими при данной точности расчетов величину необходимых затрат труда.

Также при проведении исследования использовались **специальные (частные) принципы нормирования труда, обусловленные используемыми подходами:**

6) динамичность – необходимость изменения норм при существенном для данной точности расчетов изменении условий, на которые они были рассчитаны;

7) вовлеченность работников – методика оценки трудоёмкости опиралась на высококвалифицированных работников службы заказчика и их опыт, подтверждённый стажем работы в организации (рис. 1);

8) объективность как возможность с помощью новой методики рассчитывать и обосновывать реально необходимую численность штатных единиц с приемлемым уровнем отклонения с количественной привязкой;

9) универсальность, которая могла бы обеспечить возможность учёта специфики деятельности работников различных подразделений на основе интеллектуальных технологий комплексного оценивания факторов сложности работ (рис. 2), влияющих на трудоёмкость. Данная технология позволяет исключить манипуляции;

10) вариативность подходов к определению трудовых норм, исходя из многообразия видов и содержания работ, определяемых особенностями выполнения функций в рамках регламентов и других работ в соответствии с локально-нормативными актами с учётом уровня квалификации (рис. 3);

11) простота применения, обеспечивающая возможность должностным лицам принятия управленческих решений, имеющим и не имеющим специальные знания в сфере нормирования труда;

12) наглядность, предусматривает отображение результатов расчётов на интерактивной панели (DashBoard) для численного и графического анализа комплекса полученных данных о количественно-квалификационном составе подразделений, индивидуальной нагрузке работников и других данных при введении раздельного сервиса (рис. 4);

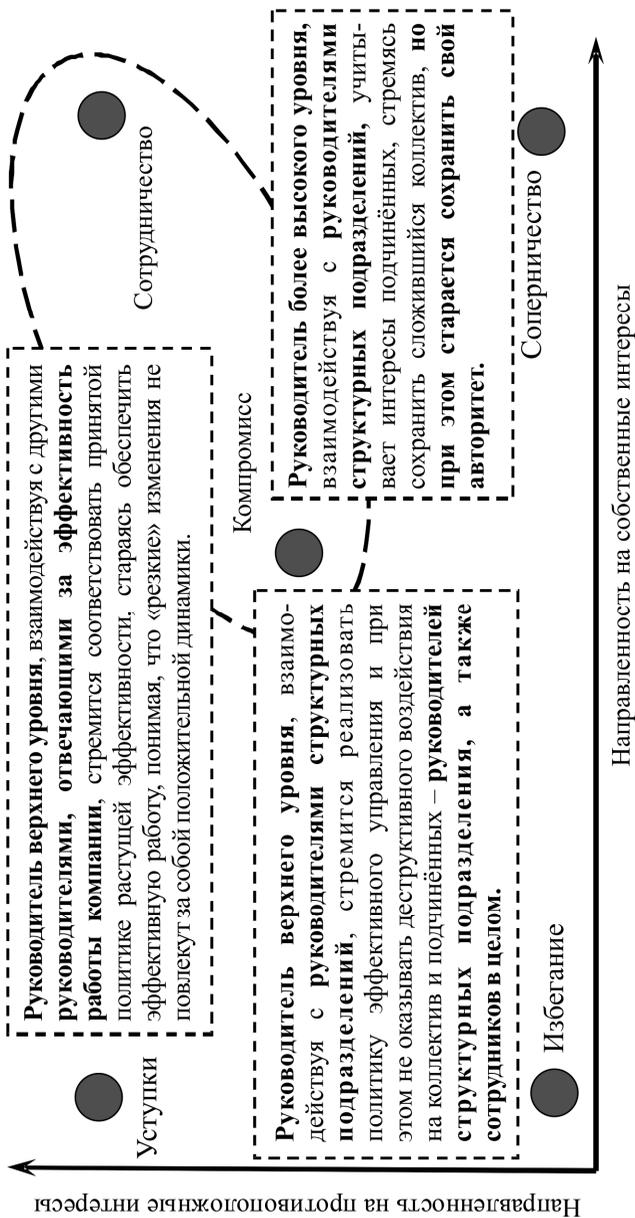


Рис. 1. Ожидаемая типология поведения в соответствии с «реши́той менеджмента»

№ Фактора	1		2		3		4		5		6		7		18		
	Фактор 1		Фактор 2		Фактор 3		Фактор 4		Фактор 5		Фактор 6		Фактор 7		Фактор 18		
Наименование фактора	4		10		5		5		5		5		5		6		
Рейтинг значимости фактор	4		10		5		5		5		5		5		6		
Допустимые минимальный и максимальный баллы эксперта	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	
	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	
Баллы экспертов и итоговая оценка, полученная инструментом "Активная экспертиза", используемым для оценки важности фактора	№ Э	О	№ Э	О	№ Э	О	№ Э	О	№ Э	О	№ Э	О	№ Э	О	№ Э	О	
	1	5	1	10	1	7	1	5	1	7	1	3	0	1	6	1	6
	2	2	2	10	2	3	2	3	2	5	2	2	2	2	5	2	3
	3	2	3	10	3	5	3	6	3	5	3	5	3	3	7	3	2
	4	1	4	10	4	2	4	1	4	6	4	6	4	4	2	4	9
	5	4	5	10	5	1	5	2	5	5	5	5	5	5	3	5	8
Итого:	4	6	10	6	5	6	5	6	5	Итого: 5	5	Итого: 5	5	Итого: 5	5	6	5
	7		10		5		7		6		5		7		9		
	8		10		5		7		6		5		7		9		
	9		10		5		7		6		5		7		9		
	Итого: 10						Итого: 5						Итого: 5		Итого: 6		

Рис. 2. Определение экспертами рейтинга значимости факторов, влияющих на сложность (длительность) работ

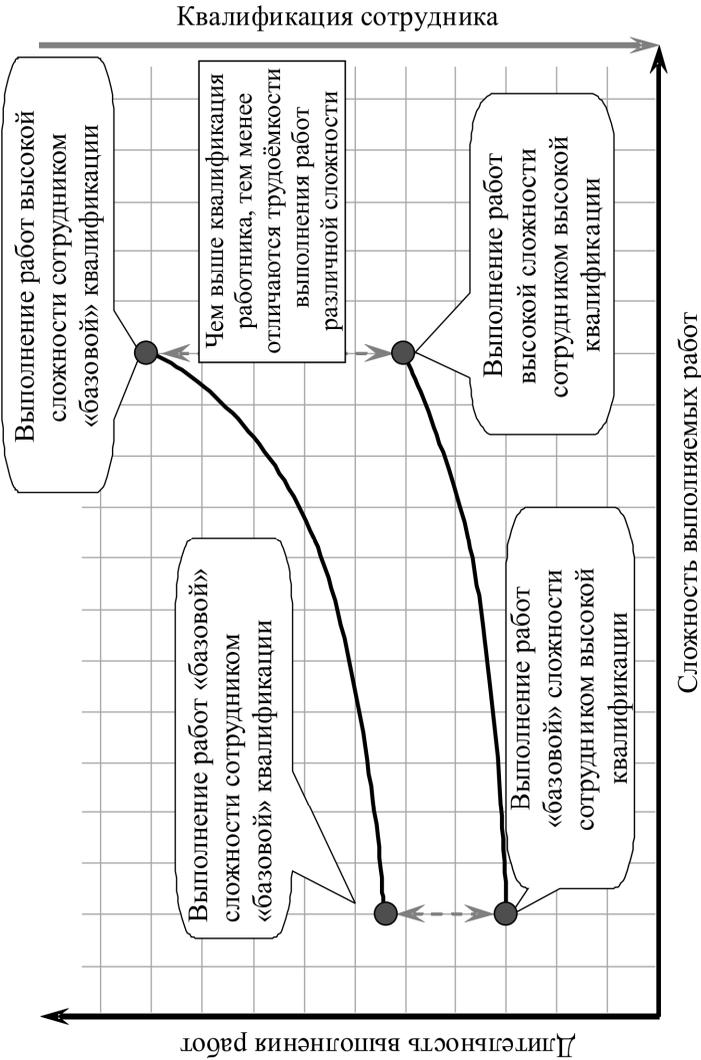


Рис. 3. Аналитическая взаимосвязь сложности выполнения и квалификации сотрудника на длительность работ

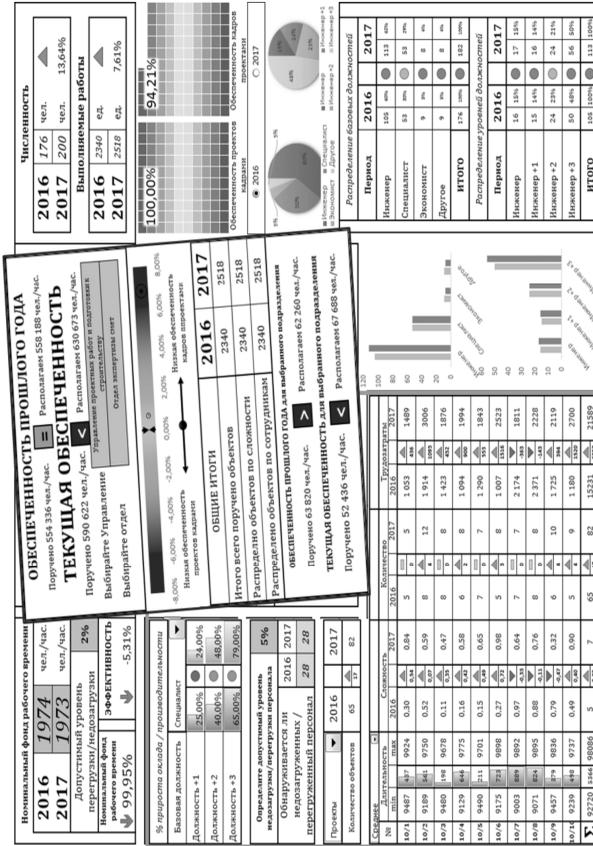


Рис. 4. Отображение на Dashboard («Интерактивная панель управления») комплекса данных об индивидуальной нагрузке работников в разрезе бизнес-процессов, а также подразделений с учётом количественного и качественного состава работников, содержащих различные разрезы норм труда и используемой при разработке управленческих решений при переходе на систему раздельного сервиса

13) оптимальность состава и содержания переменных в расчетных формулах, в первую очередь требующих дополнительных исчислений, в том числе подготовка таблиц с постоянными и переменными величинами различных параметров, обусловленных спецификой выполняемых работ, существующими нормами и единством организационно-технических условий.

3. Определение факторов, необходимых для разработки расчётной модели

В процессе исследования определены факторы, влияющие на численность работников подразделений службы заказчика по бурению для выполнения работ по системе раздельного сервиса. Изменение данных параметров для различных подразделений службы заказчика влияет на трудоёмкость работ, поэтому закладываются в расчётную модель. К ним относятся:

- ◆ количество скважин, ед. (прирост числа скважин в соответствии с планом, %);
- ◆ средняя глубина скважины, м (прирост средней глубины на 1 скважину, м/ед.);
- ◆ прирост объёма документооборота, %;
- ◆ количество метров, относящихся к раздельному сервису, м (доля раздельного сервиса, %);
- ◆ среднее количество подрядчиков, шт.;
- ◆ количество одновременно наблюдаемых объектов, шт. (доля одновременно наблюдаемых объектов, %);
- ◆ количество объектов с непосредственным присутствием, шт.

Оптимальность состава и содержание постоянных и переменных величин различных параметров в расчетных формулах, определены спецификой выполняемых работ, существующими нормами и единством организационно-технических условий.

При обосновании численности работников подразделений служб по бурению модель позволяет получить результаты по максимальным, минимальным и средним значениям. На данном этапе необходимо определить и согласовать момент возникновения ставки или необходимость привлечения нового сотрудника. Были определены два подхода:

◆ в первом случае возникновение ставки (максимальные значения прироста численности) основано на учёте работ, связанных с количественными показателями, приходящимися на одного сотрудника в конкретном отделе в среднем и не связанными с количественными показателями;

◆ во втором случае (минимальные значения прироста численности) ставка возникает только при условии прироста количественных показателей.

Рекомендуется в целях обеспечения оптимальной напряженности, стимулирования внедрения мероприятий по повышению организационно-технического уровня выполнения работ, объективного снижения трудоёмкости в процессе освоения системы раздельного сервиса, а также, исходя из экономико-хозяйственных условий компании службы заказчика, принимать решения по минимальным значениям.

4. Заключение

В качестве заключения следует отметить, что расчётная модель построена на базе сложившегося организационно-технического уровня выполнения работ на момент исследования в условиях начальной стадии освоения раздельного сервиса. В прогнозном периоде при проведении мероприятий по улучшению организационно-технического уровня выполнения работ возможно снижение факторов влияния (%). Сами мероприятия, разработанные на основе интервьюирования, можно включить в план работ на последующие периоды. Разработанная расчётная модель, выполненная в Excel, позволяет вносить изменения и получать различные срезы данных для обоснования управленческих решений.

Литература

1. БЪЕРН АНДЕРСЕН. *Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования* / пер. с англ. С.В. Ариничева; науч. ред. Ю.П. Адлер. – М.: Стандарты и качество, 2003. – 272 с.

2. ГРИТАНС Я.М. *Организационное проектирование и реструктуризация (реинжиниринг) предприятий и холдингов: экономические, управленческие и правовые аспекты: практ. пособие по упр. и финансовому консультированию.* – 2-е изд., доп. – М.: Волтерс Клувер, 2008. – 213 с.
3. ЕЛИФЕРОВ В.Г., РЕПИН В.В. *Бизнес-процессы: регламентация и управление: учеб. пособие для слушателей образоват. учреждений, обучающихся по программе МВА и др. программам подгот. упр. кадров / Ин-т экономики и финансов «Синергия».* – М.: Инфра-М, 2011. – 317 с.
4. ИВАНОВ В.С., СУХОВ С.В. *Организационное управление и реинжиниринг бизнес-процессов: монография / М-во образования Рос. Федерации; Междунар. ун-т бизнеса и новых технологий (ин-т).* – Ярославль: МУБиНТ, 2002. – Ч. 1. – 95 с.
5. *Интеллектуальные технологии обоснования инновационных решений: монография / В.А. Харитонов [и др.]; под науч. ред. В.А. Харитонова.* – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 342 с.
6. ИСАЕВ Г.Г., ЧЕРНЫШЕВ И.В. *Реинжиниринг бизнес-процессов: учеб.-метод. комплекс / М-во образования Рос. Федерации; Ульян. гос. техн. ун-т; Ин-т дистанц. образования.* – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2003. – 133 с.
7. КУЛЬЧИЦКИЙ В.В. *20 лет развития российского супервайзинга // Нефтяное хозяйство.* – 2013. – № 2.
8. РЕПИН В.В. *Бизнес-процессы компании: построение, анализ, регламентация.* – М.: Стандарты и качество, 2007. – 239 с. – С. 227–228.
9. РЕПИН В.В., ЕЛИФЕРОВ В.Г. *Процессный подход к управлению: моделирование бизнес-процессов.* – М.: Стандарты и качество, 2004. – 404 с. – С. 371–372.
10. ХАРИТОНОВ В.А., БЕЛЫХ А.А. *Технологии современного менеджмента.* – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 190 с.
11. ХАРРИНГТОН Д., ЭССЕЛИНГ К.С., НИМВЕГЕН Х. *Оптимизация бизнес-процессов. Документирование, анализ, управление, оптимизация: пер. с англ.* – СПб.: Азбука: БМикро, 2002. – 317 с.

DEVELOPMENT OF THE MODEL OF MANAGEMENT OF QUANTITATIVE QUALITATIVE STRUCTURE OF SPECIAL-SHEETS OF OIL-PRODUCING ENTERPRISES IN TRANSITION TO SEPARATE SERVICE AT DRILLING

Alexander Ivanov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand. Sc., assistant professor (aa_ivanov@mail.ru).

Boris Petrov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, (495) 000-00-00).

Viktor Sidorov, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, student (viktor.sidorov@mipt.ru).

Abstract: The article presents the development of a calculation model for determining the quantitative and qualitative composition of the Customer Service specialists in transitioning to a separate service system for drilling wells, practically implemented at an oil and gas production enterprise. The directions of development of forms and methods of organization of production and marketing of products at oil-producing enterprises are shown. Formulated traditional and private principles used in the developed model. The factors influencing the work-rate of work and the number of specialists of the Customer's service during the transition to separate service while drilling wells are singled out.

Keywords: Oil producing enterprises, drilling wells, separate service, calculation model, management decisions, qualitative and qualitative composition.

ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИНАНСОВОГО СОСТОЯНИЯ

Гуреева Е.Г.¹, Гуреева А.Н.²

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Продемонстрированы прикладные подходы к моделированию финансового состояния с использованием стандартных инструментов для обоснования управленческих решений. Описаны задачи и имеющиеся ограничения, а также процесс поиска оптимального решения с использованием стандартной надстройки Excel. Представленный материал обладает скорее практической направленностью и призван продемонстрировать возможности применения стандартных решений в индивидуальных для каждого субъекта задачах. Отмечается, что представленный материал является лишь началом весьма значительного исследования, направленного на разработку системы поддержки принятия решений в задачах управления финансовым состоянием предприятия.

Ключевые слова: прикладные технологии, финансовое состояние, программные средства, ограничения, стандартные надстройки, целевые значения.

1. Введение

Финансовая стратегия современного предприятия, определяющая оптимальные пути распределения дефицитных финансовых и материальных ресурсов, является одной из важнейших видов его функциональных стратегий.

Возможности проведения финансового моделирования при разработке финансовой стратегии ограничены без применения

¹ Елена Григорьевна Гуреева, кандидат экономических наук, доцент (eglitman@mail.ru).

² Гуреева Анна Николаевна, магистр (anvereten@mail.ru).

программных средств. Предприятия заинтересованы в разработке компьютерных финансовых моделей, основанных на ключевых для бизнеса показателях. Инструмент же для финансового моделирования каждый специалист выбирает на собственное усмотрение, исходя из ряда показателей, таких как эффективность и удобство работы, трудоемкость создания и поддержания модели, прозрачность и обозримость модели, возможность проверки модели, методическое наполнение и др.

Традиционно для автоматизации создания и работы с моделью используются два класса программных продуктов:

- ◆ «открытые» – Excel, а также решения на его основе;
- ◆ «закрытые» – специализированные программные продукты, содержащие логику построения финансовой модели и методологию ее анализа.

К «готовым продуктам» относят «Альт-Инвест», Project Expert, Comfar (UNIDO), «ИНЭК-Аналитик», Prime Expert, полноразмерные ERP-программ (Enterprize Resource Planning) и т.д. В этом случае разработчики предлагают пользователям готовые методики и инструменты.

Однако трудность заключается в том, что в настоящий момент недостаточно доступных и простых технологий, позволяющих произвести «обратный» расчёт для определения целевых значений статей финансовой отчётности, оценка которых по известным коэффициентам или принятой на предприятии системе оценки достижения финансово-экономических значений ключевых показателей эффективности определится как «нормативная» и станет целью деятельности предприятия на долгосрочный период.

Методологические и методические основы прогнозирования и стратегического планирования, в том числе в финансовом менеджменте, представлены в работах как зарубежных, так и отечественных учёных. К широко известным можно отнести: М. Портера, А.И. Бланка, Р. Брейли, С. Майреса, Ю.Ф. Бригхэма, М.С. Эрхардта, Дж. Шима [1, 2, 3, 4, 5], А.М. Ковалева, Г.В. Клейнер, В.В. Бочарова, Т.А. Владимирова и других [6, 7, 8, 9].

Цель данной статьи – описать новые прикладные решения проблемы прогнозирования финансовых показателей, необхо-

димых для обоснования управленческих решений, с использованием стандартных инструментов Excel.

2. Описание задачи и имеющихся ограничений

В примере использованы далеко не все существующие методы анализа и оценки финансово-экономического состояния. Однако для демонстрации предлагаемого подхода этого вполне достаточно.

На первом этапе известными методами проводится расчёт фактических значений основных финансовых показателей – ликвидности и финансовой устойчивости (табл. 1, 2), а также анализ ликвидности баланса по соотношению различных групп активов и пассивов (табл. 3).

Таблица 1. Основные финансовые коэффициенты, полученные при анализе (факт) и после применения модели «Поиск решения» (прогноз)

Наименование показателя	Значения на конец периода (факт)	Значения расчётные (прогноз)
I. Коэффициенты ликвидности		
Коэффициент абсолютной ликвидности	0,02	0,31
Коэффициент срочной ликвидности	0,81	1,32
Коэффициент текущей ликвидности	0,86	2,31
II. Показатели структуры капитала (коэффициенты финансовой устойчивости)		
Коэффициент финансовой независимости	0,07	0,64
Коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами	-0,09	0,56
Суммарные обязательства к суммарным активам	0,93	0,36
Коэффициент текущей задолженности	0,93	0,25
Долгосрочные обязательства к активам	0,00	0,11
Суммарные обязательства к собственному капиталу	13,53	0,56

Таблица 2. Финансовая устойчивость, полученная при анализе (факт) и после применения модели «Поиск решения» (прогноз)

Наименование показателя	Значения на конец периода (факт)	Значения расчётные (прогноз)
Коэффициент автономии	0,07	0,64
Коэффициент соотношения заемных средств к собственным источникам	13,53	0,56
Собственные оборотные средства		
СОС (собственные источники – внеоборотные активы)	–89 073	499 500
Собственные и долгосрочные заемные источники формирования оборотных средств		
СД (собственные источники + долгосрочные заемные средства – внеоборотные активы)	–89 073	664 348
Общая величина основных источников формирования запасов (ОИФ)		
ОИФ (СД + краткосрочные кредиты и займы + кредиторская задолженность поставщикам)	861 983	1 059 615
Текущая финансовая устойчивость		
а) Абсолютная устойчивость (запасы \leq СОС)		✓
б) Нормальная устойчивость (СОС \square запасы \leq СД)		
в) Неустойчивая устойчивость (СД \square запасы \leq ОИФ)	✓	
г) Кризисная устойчивость (запасы \square ОИФ)		

Таблица 3. Ликвидность баланса, полученная при анализе (факт) и после применения модели «Поиск решения» (прогноз)

Значения на конец года (факт)					Значения расчётные (прогноз)				
171 170	A4	>!	П4	120 315	663 017	A4	<	П4	997 668
57 942	A3	>	П3	0	392 870	A3	>	П3	164 849
847 008	A2	>	П2	121 808	404 525	A2	>	П2	321 926
22 551	A1	<!	П1	951 056	121 578	A1	>	П1	75 267

На втором этапе выделяются те показатели, которые имеют рекомендуемые значения, и определяются (столбец – факт, выделено цветом) отклонения. Финансовые показатели носят как нормативный, так и рекомендательный характер. Изучение различных информационных источников (в зависимости от отрасли, авторской разработки, даты выхода научно-практических разработок и т.д.) показало наличие достаточно больших различий по ряду коэффициентов.

Как видно, существуют проблемы ликвидности, финансовой устойчивости, т.е. у предприятия есть серьёзные проблемы, которые могут повлиять на дальнейшее развитие.

При формировании будущей модели важно выделить те ограничения, которые следует учитывать:

- ◆ отчёт о финансовых результатах принимается как факт или прогноз для расчётов;

- ◆ требуется указать необходимый перечень изменяемых статей баланса;

- ◆ определить в модели строго положительные и отрицательные значения (например, «Нераспределенная прибыль (непокрытый убыток)», «Переоценка внеоборотных активов»);

- ◆ задать количество ограничений в зависимости от потребностей самого предприятия и руководителя;

- ◆ определить «пороговые» значения коэффициентов, принятые неравенства для анализа ликвидности, допустимые значения при оценке вероятности банкротства, недопустимые значения текущей финансовой устойчивости и т.д.

3. Процесс поиска оптимального решения с использованием стандартной надстройки Excel

Решение описанной задачи в условиях представленных ограничений может быть выполнено с использованием стандартной надстройки Excel «Поиск решения». Для представленного примера применяется следующий алгоритм получения целевого значения (табл. 4): определяются ограничения (минимальные и максимальные) на значения коэффициентов ликвидности и финансовой устойчивости; рассчитываются средние значения по ограничениям;

средние значения перемножаются и полученный результат и является целевым значением.

Таблица 4. Анализ по методам оценки вероятности банкротства предприятия

Наименование показателя	Min	Max	Medium
Коэффициент абсолютной ликвидности	0,2	0,5	0,455
Коэффициент срочной ликвидности	0,7	1,5	1,455
Коэффициент текущей ликвидности	2	3	3,505
Коэффициент финансовой независимости	0,5	0,8	0,905
Суммарные обязательства к суммарным активам	0,2	0,5	0,455
Коэффициент текущей задолженности	0,1	0,3	0,255
Долгосрочные обязательства к активам	0,1	0,5	0,355
Суммарные обязательства к собственному капиталу	0,25	1	0,755
Целевое значение	0,065		

Ограничения и целевая ячейка, целевое значение и дополнительные ограничения указываются в окне формирования модели для надстройки «Поиск решения» (рисунок).

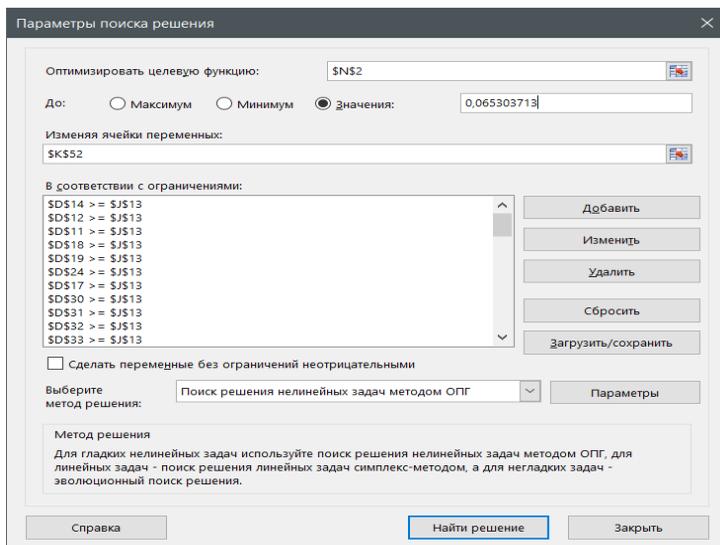


Рис. Пример формирования модели «Поиск решения»

Метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ), как показала практика, самый надёжный вариант поиска решения. В остальных случаях с большей вероятностью программа не может справиться с задачей.

Полученные результаты (столбцы – прогноз) показательны (см. табл. 1, 2, 3). Расчёты коэффициентов, имеющих рекомендации (ограничения), демонстрируют соответствие. При этом по модели ликвидности баланса было получено полное соответствие, а также достигнут «наивысший» результат при оценке текущей финансовой устойчивости. Учитывая тот факт, что все расчёты проводились на базе стартовых значений баланса в Excel, можно представить прогнозный баланс и его рекомендуемую структуру при условии неизменности «Отчёта о финансовых результатах».

Из полученных результатов руководителю будет видно, какие именно решения позволят достигнуть «идеального состояния». Это может быть: увеличение объёма внеоборотных активов, снижение объёма оборотных активов, снижение дебиторской задолженности, реструктуризация краткосрочной задолженности и другие.

4. Заключение

Необходимо подчеркнуть простоту и удобство применяемого подхода к моделированию. Предприятие получает ещё один инструмент моделирования для видения будущего в разрезе «нормативных» значений финансово-экономических показателей, а руководители и сотрудники – плановые ключевые показатели эффективности своей деятельности.

Литература

1. БЛАНК И.А. *Управление финансовыми ресурсами*. – М.: Омега-Л, 2011. – 768 с.
2. БРЕЙЛИ Р., МАЙРЕС С. *Принципы корпоративных финансов*. – М.: Олимп-Бизнес, 2014. – 680 с.
3. БРИГХЭМ Ю.Ф., ЭРХАРДТ М.С. *Финансовый менеджмент*. – СПб: Питер, 2015. – 580 с.
4. БОЧАРОВ В.В., ЛЕОНТЬЕВ В.Е. *Корпоративные финансы*. – СПб.: Питер, 2004. – 272 с.

5. ВЛАДИМИРОВА Т.А., КОЖУХОВА Т.Г., ДМИТРИЕВ С.В. *Формализация целеполагания в управлении корпоративными финансами* // Сибирская финансовая школа. – 2012. – № 6. – С. 101–105.
6. ГЕНИБЕРГ Т.В., ИВАНОВА Н.А., ПОЛЯКОВА О.В. *Сущность и методические подходы разработки финансовой стратегии.* – URL: https://nsuem.ru/science/publications/science_notes/issue.php?ELEMENT_ID=3344 (дата обращения: 14.07.2017).
7. КЛЕЙНЕР Г.Б. *Стратегия предприятия.* – М.: Дело, 2008. – 568 с.
8. ТОМПСОН-МЛ. И ДР. *Стратегический менеджмент: концепции и ситуации для анализа.* – М.: Вильямс, 2006. – 928 с.
9. ШИМ ДЖ. *Финансовый менеджмент.* – М.: Филинь, 1996. – 400 с.

APPLIED TECHNOLOGIES OF MODELING THE FINANCIAL CONDITION

Gureeva Elena, Perm National Research Polytechnic University (Perm), assistant professor (egliman@mail.ru).

Gureeva Anna Master of the Departments Building Engineering and Materials Engineering of the Faculty of Construction of the State Educational Establishment of the Russian Federation in Pnipu (anvereten@mail.ru).

Abstract: The article demonstrates applied approaches to the modeling of financial condition using standard tools for substantiating management decisions. Describes tasks and constraints, as well as the process of finding the optimal solution using the standard Excel add-in. The presented material has, rather, a practical focus and is intended to demonstrate the possibilities of using standard solutions in individual tasks for each subject. It is noted that the material presented is only the beginning of a very significant study aimed at developing a decision support system in the tasks of managing the financial condition of the enterprise.

Keywords: Applied technologies, financial condition, software tools, restrictions, standard add-ins, target values.

УДК 338.47: 656+ 338.24.01
ББК 65.05+60.8

ЗНАЧИМОСТЬ ОБЪЕДИНЕНИЯ ПРИНЦИПОВ СВЯЗАННОСТИ И ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ ФАКТОРОВ МОДЕЛЕЙ РЫНКОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЫНОЧНОЙ СИСТЕМОЙ

Гуреев К.А.¹

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь,
Негосударственное образовательное учреждение высшего
образования «Московский технологический институт»)*

Гуреева А.Н.²

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

В статье обсуждается «зародившееся» направление развития механизмов комплексного оценивания как результат применения инструмента в процессах моделирования рынков и рыночной системы. Материал представляет собой краткое ознакомление с возможностями, открывающимися перед исследователями с использованием нового программного комплекса EDeKonModal, относящегося к общему семейству продуктов DeKon. Представленные примеры описывают возможности построения моделей, связанных различными последовательностями и дополнительными промежуточными расчётами, использующими одновременно один и тот же элемент в нескольких моделях на различных уровнях. В работе частично описывается проблема поиска оптимального решения в условиях реализации столь сложных моделей.

¹ Кирилл Александрович Гуреев, кандидат экономических наук, доцент (gureev.prof@gmail.com).

² Гуреева Анна Николаевна, магистр (anvereten@mail.ru).

Ключевые слова: рынок, спрос и предложение, модели комплексного оценивания, алгоритм декомпозиции, дискретная функция, связанность и взаимозависимость факторов, управление рынком, моделирование сложных систем.

1. Введение

В попытках создать динамическую модель рыночной системы, выбирая в качестве инструмента моделирования механизмы комплексного оценивания, основанные на деревьях критериев и матрицах свёртки, исследователь невольно сталкивается с вопросом о том, что будет являться «катализатором» для начала изменения отдельных факторов, т.е. приведёт систему в движение [1, 2]. Если попытаться несколько шире описать проблему, то требуется выделить укрупнённые этапы построения динамической модели рыночной системы:

- ◆ определение множества критериев, участвующих в формировании моделей, построение моделей рынков, установление взаимосвязей рынков в системе путём объединения критериев, установления взаимозависимостей различного типа;

- ◆ анализ рыночной системы и определение первоначальных значений каждого из критериев, оценка полученных моделей спроса и предложения, равновесного состояния и установление достоверности получаемых исходных данных;

- ◆ определение возможных «происшествий» и установление их влияния с учётом масштабов изменений, определение группы факторов, получающих изменения, оценка последствий.

В представленной последовательности укрупнённых этапов в действительности именно последний вызывает наибольшие затруднения.

Актуальным вопросом при построении модели рыночной системы является определение перечня возможных изменений и то, каким образом провести оценку их влияний [4]. С пониманием того, что изменения могут быть различны, требуется устанавливать весь возможный перечень взаимных влияний, градации воздействий и их связанность. Именно этим вопросам и посвящается данный аналитический материал, предвещающий

построение модели управления рыночной системой, учитывающей все возможные «рыночные шоки».

2. Термины, определения, классификация

В современной макроэкономике под «шоком» понимается неожиданное резкое изменение либо совокупного спроса, либо совокупного предложения. Для большего понимания можно воспользоваться одним из существующих определений: «Экономический шок – это экономическое явление, при котором происходит неожиданное изменение совокупного спроса или совокупного предложения. Такие изменения могут приводить как к благоприятным последствиям, так и к неблагоприятным. В любом случае экономике приходится приспосабливаться к новым условиям и переходить к новому состоянию равновесия».

При этом ограничивать изменения лишь шоками – совершенно недальновидная позиция, поскольку существуют и плановые изменения, обусловливаемые естественными событиями в экономической системе.

Равно как и при определении экономических шоков выделяют эндогенные и экзогенные воздействия, так и при моделировании с использованием механизмов комплексного оценивания могут выделять факторы внутренние, изменяющиеся по решению участников рынка, и внешние факторы, оказывающие влияние на решения участников, т.е. на факторы, определяющие модели спроса и предложения.

Необходимо отметить и некоторое несогласие с существующим разделением макро- и микроэкономики. Скорее корректным было бы назвать это различие принципов построения моделей, вытекающее из преимуществ технологий комплексного оценивания. В литературе упоминается, что спрос и предложение в микроэкономике по группе потребителей (или отраслевые спрос и предложение) представляют собой простое суммирование индивидуальных кривых спроса и предложения, тогда как в макроэкономике совокупные спрос и предложение не являются простым суммированием индивидуальных спроса и предложения, поскольку выводятся на основе принципиально других экономических предпосылок. При этом очевидно, что использование ме-

ханизмов комплексного оценивания позволяет одновременно проводить и суммирование индивидуальных моделей и «добавлять» к уже суммарной модели новые факторы, относящиеся и учитываемые лишь при анализе на макроэкономическом уровне.

Отрицать преимущества использования моделей комплексного оценивания (МКС), придающих моделированию рыночных систем новый «толчок», опрометчиво.

Взаимозависимость и связанность факторов в моделировании рыночной системы с использованием МКС предполагают, что часть из множества факторов, образующих модели отдельных рынков, взаимосвязаны через количественные значения напрямую или с использованием функции, формирующей пропорциональные или непропорциональные изменения, зависящие от заданных исследователем соотношений [3]. Также необходимо отметить, что один и тот же фактор может в явном виде присутствовать в нескольких моделях. Степень его влияния на итоговую комплексную оценку может быть различной, однако изменения значения фактора приведут к изменениям в обеих моделях.

3. Существующие реализации для проведения прикладных расчётов

Реализация описанных принципов для проведения прикладных расчётов в настоящий момент находится лишь на начальном этапе создания. Потребность в подобных подходах была определена выбранным направлением исследования – моделирование рынков с использованием МКС на основе деревьев критериев и матриц свёртки. Единственная версия программного продукта из семейства Dekon, которая обладает возможностью проведения подобных построений, – EDeKonModal (Dekon, выстроенный на основе Microsoft Excel с использованием стандартных функций продукта и макросов, обеспечивающих реализацию дополнительных модулей, таких как «анализ чувствительности», «подбор множества значений функций»).

Примеры расчётов (рисунок) наглядно демонстрируют наличие в настоящий момент следующих возможностей:

– построение «классических» моделей с использованием различных типов шкал приведений критериев, диапазонов значений, наполнений матриц свёртки и т.д.;

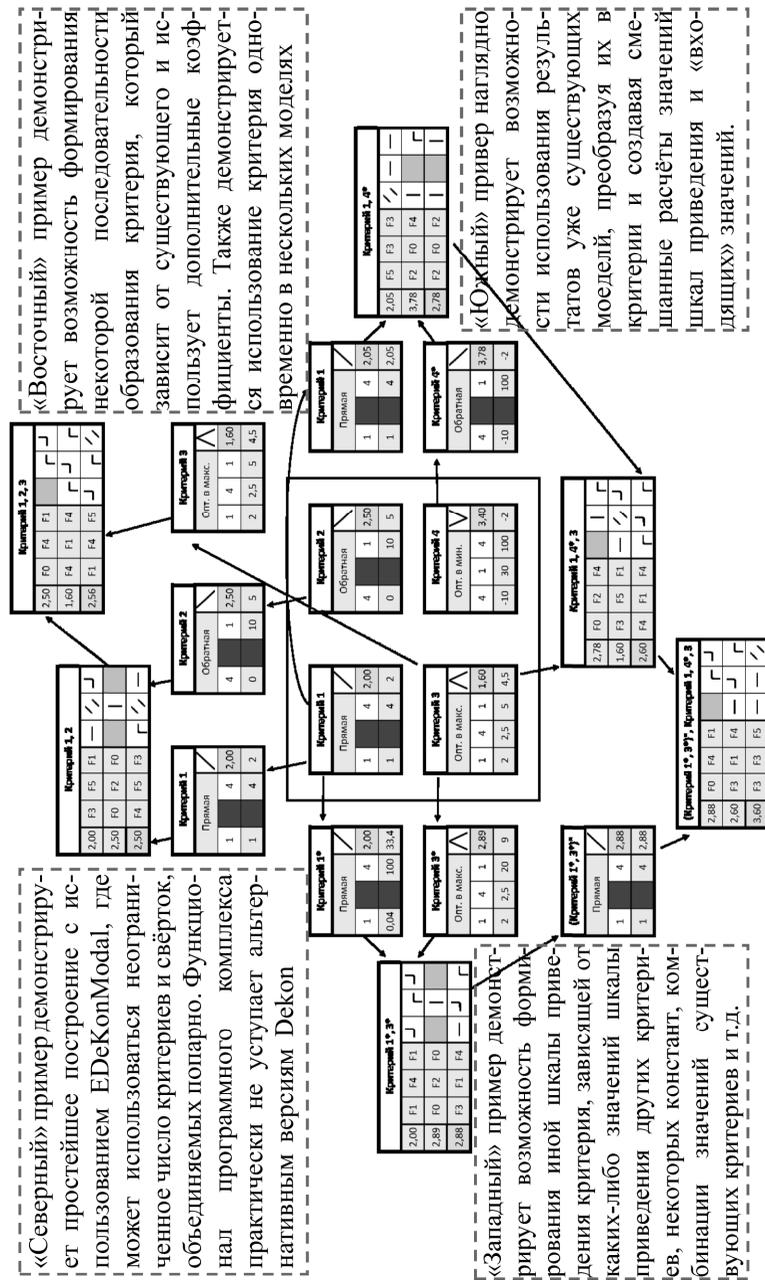


Рис. Примеры построенных моделей в программном комплексе EDeKonModal

– построение моделей с использованием «промежуточных» значений, определяющих изменения критериев с использованием коэффициентов, любых смешанных расчётов;

– построение моделей с использованием в качестве основы «поля» критериев и всесторонним «смешиванием» новых свойств построения.

4. Выводы

В настоящий момент моделирование рынков и рыночной системы как самостоятельное направление исследование, явившееся «точкой роста» для некоторых возможностей программных комплексов семейства Dekon, сталкивает с необходимостью реализации некоторых весьма сложных модулей.

Примером такого модуля может быть «Модуль перебора всех значений модели» [1]. Его задача формулируется как «вывод всех возможных вариантов критериев, позволяющих получить искомое значение комплексной оценки». Данный модуль должен обеспечить первичную возможность поиска оптимального управления при условии, что изменение каждого из критериев обладает стоимостным исчислением, а достичь искомое значение по каждой из моделей можно множеством различных комбинаций значений критериев. Следовательно, среди всех вариантов значений критериев существует некоторый (некоторые) вариант, являющийся оптимальным по затратам.

Учитывая описываемые принципы связанности и взаимозависимости факторов, расчёт будет усложнён с точки зрения описания, однако весьма упрощён с точки зрения реализации, поскольку часть требований к возможностям моделирования, используемым при создании моделей рынков и рыночной системы, в настоящий момент практически реализована.

Литература

1. ГУРЕЕВ К.А. *Обоснование необходимости разработки алгоритма декомпозиции моделей комплексного оценивания* [Электронный ресурс] // Управление большими системами. УБС'2016: материалы XIII Всерос. шк.-конф. молодых уче-

- ных; 5–9 сент. 2016 г, Самара / под общ. ред. Д.А. Новикова, В.Г. Засканова; Ин-т проблем управл. им. В.А. Трапезникова, Самар. нац. исслед. ун-т им. акад. С.П. Королева. – М.: ИПУ РАН, 2016. – С. 363–370.
2. ГУРЕЕВ К.А. *Исследование рынков инструментальными средствами моделирования поведения* // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2015. – URL: <http://uecs.ru/teoriya-upravleniya/item/3672-2015-08-27-06-30-26>.
 3. ГУРЕЕВ К.А. *Моделирование динамических рыночных систем* // Экономика и предпринимательство. – 2015. – № 11, ч. 2. – С. 940–943.
 4. *Интеллектуальные технологии обоснования инновационных решений: моногр.* / В.А. ХАРИТОНОВ [И ДР.]; под науч. ред. В.А. Харитонова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 342 с.

**THE IMPORTANCE OF THE UNIFICATION
OF THE PRINCIPLES OF SVYANITY
AND THE INTERDEPENDENCE OF THE FACTORS
OF MARKET MODELS UNDER THE MANAGEMENT
OF THE MARKET SYSTEM**

Gureev Kirill, Perm National Research Polytechnic University, Moscow Institute of Technology (Moscow business school), assistant professor (gureev.prof@gmail.com).

Gureeva Anna Master of the Departments Building Engineering and Materials Engineering of the Faculty of Construction of the State Educational Establishment of the Russian Federation in Pnipu (anvereten@mail.ru).

Abstract: The article discusses the "emerging" direction of the development of integrated assessment mechanisms, as a result of the application of the tool in the processes of modeling markets and the market system. The material is a brief introduction to the possibilities that are opening up for researchers using the new EDeKonMo-

dal software package, which belongs to the common family of Dekon products. The presented examples describe the possibilities of constructing models connected by different sequences and additional intermediate calculations, which simultaneously use the same element in several models at different levels. The paper partially describes the problem of finding the optimal solution under the conditions of implementing such complex models.

Keywords: market, supply and demand, integrated assessment models, decomposition algorithm, discrete function, connectivity and interdependence of factors, market management, complex system modeling.

МАТРИЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ, ЭЛЕМЕНТЫ МАТРИЦ СВЁРТКИ КОТОРЫХ ОПРЕДЕЛЕНЫ В НЕЧЁТКОМ ВИДЕ

Алексеев А.О.¹

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Формулируется задача комплексного оценивания сложных объектов, под которыми понимаются объекты (группа объектов или система), свойства которых могут быть как числовой (количественно-измеримые свойства объекта), так и нечисловой (качественно-описываемые свойства объекта) природы с помощью матричных механизмов нечёткого комплексного оценивания. Показано применение матричных механизмов комплексного оценивания, элементы матриц свёртки которых определены в нечётком виде.

Ключевые слова: сложные объекты, механизмы управления, комплексное оценивание, матрицы свёртки, нечёткое комплексное оценивание.

1. Введение

Для перехода от детального описания объекта (группы объектов или систем) с использованием большого количества показателей и параметров к агрегированному описанию, основанному на небольшом числе обобщённых характеристик объекта, используются механизмы комплексного оценивания [9, с. 99]. В основе механизмов комплексного оценивания могут лежать

¹ Александр Олегович Алексеев, кандидат экономических наук, доцент (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, alekseev@cems.pstu.ru).

совершенно различные математические подходы к решению задачи агрегирования. Механизмы комплексного оценивания активно используются для решения многокритериальных задач принятия решений, оптимизации и управления многопараметрическими (многомерными) объектами.

Для целей несостоящей работы объекты (группу объектов или систему) описываемые вектором свойства будем называть сложными. Свойства сложных объектов предлагается определять кортежем (K, T, Φ) , где K – множество частных свойств (параметров,

факторов, критериев), по которым оценивается объект; данное множество образовано двумя подмножествами $K = K_q \cup K_n$; K_q –

подмножество качественно-описываемых свойств объекта, K_n –

подмножество количественно-измеримых свойств объекта; элементы множества $K_q \subseteq K, q = \overline{1, \bar{q}}$ оцениваются с помощью тер-

мов t_q из множеств $T_q: t_q \in T_q, T = \prod_q T_q, \bar{q}$ – число качественно-

описываемых свойств объекта; элементы множества $K_n \subseteq K, n = \overline{1, \bar{n}}$ оцениваются с помощью действительно-значных

шкал $x_n \in \Phi_n \subseteq R^1, \Phi = \prod_n \Phi_n, \bar{n}$ – число количественно-

измеримых свойств объекта.

Тогда состояние сложного объекта \circ задаётся в пространстве O :

$$O = \left(\prod_{q=\overline{1, \bar{q}}} K_q \times T \right) \times \left(\prod_{n=\overline{1, \bar{n}}} K_n \times \Phi \right)$$

и определяется вектором $\circ \in O: \circ = \{t_q, x_n\}, q = \overline{1, \bar{q}}, n = \overline{1, \bar{n}}$.

Задача комплексного оценивания сложных объектов заключается в установлении отображения между пространством сложных объектов и ограниченным множеством действительных значений с помощью механизма комплексного оценивания (МКО):

$$(1) \quad \text{МКО: } O \rightarrow V \subset R^1.$$

В практике решения задач комплексного оценивания себя зарекомендовали матричные механизмы комплексного оценивания, которые разрабатывались, начиная с 80-х годов XX века (см., например, [10, 11 и др.]), и совершенствуются по сей день (см., например, [1–7 и др.]).

2. Матричные механизмы комплексного оценивания

Определение. Матричный механизм комплексного оценивания (ММКО) это механизм комплексного оценивания (1), который задаётся кортежем:

$$(2) \quad \langle G, M, Q \rangle,$$

где G – граф, определяющий последовательность агрегирования (свёртки) частных факторов в комплексную оценку, узлам дерева G соответствуют матрицы свёртки;

M – множество матриц свёртки, матрица свёртки является подмножеством декартового произведения шкал качественного оценивания сворачиваемых факторов и шкалы обобщённой, агрегированной оценки;

Q – критериальное (квалиметрическое) пространство, образованное множеством шкал качественного оценивания частных факторов K , промежуточных свёрток и шкалой комплексной оценки V .

Граф G имеет структуру бинарного дерева (рис. 1), листьями которого являются факторы, принадлежащие множеству K , корневая вершина, соединённая 2 рёбрами, является узлом, в котором определяется комплексная оценка $v \in V$, остальные вершины графа имеют 3 ребра.

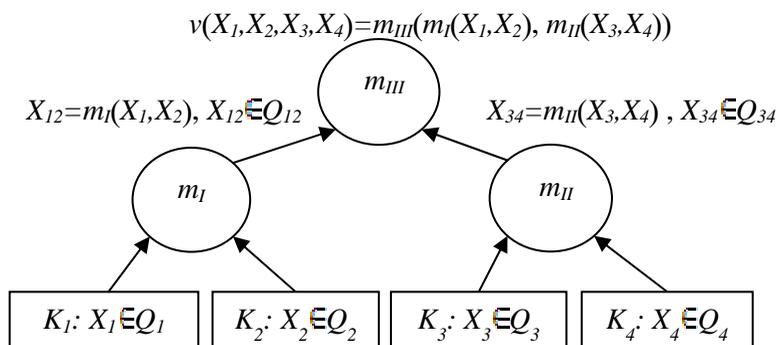


Рис. 1. Пример графа ММКО для 4 факторов

Бинарная структура дерева (см. рис. 1) объясняется тем, что такая структура соответствует наименьшему количеству элементов матриц свёртки, которые требуется определить для построения ММКО, что было доказано в исследовании [12].

Правило агрегирования пары факторов представляется в виде матрицы свёртки $m \in M$ размерностью $\bar{r} \times \bar{c}$, где \bar{r} и \bar{c} – максимальное значение шкал оценивания сворачиваемых критериев X_r и X_c (рис. 2).

Размерность матриц свёртки определяется условиями прикладной задачи комплексного оценивания сложных объектов или систем, поэтому все последующие рассуждения будем вести в общем виде, а для единообразия иллюстраций на рисунках будем использовать матрицы свёртки размерностью 4×4 .

Элементы матрицы свёртки m_{rc} заполняются экспертами

с учётом приоритетности тех или иных свойств, где $r \in \{1, \dots, \bar{r}\}$

и $c \in \{1, \dots, \bar{c}\}$ – номера строк и столбцов матрицы (см. рис. 2)

соответственно. Другими словами, элементы матрицы определяются экспертами по составным правилам вывода «если критерий $X_r = r$ и критерий $X_c = c$, то их свёртка $X(X_r, X_c) = m_{rc}$ ».

$X(X_r, X_c)$				X_r	
	m_{44}	m_{43}	m_{42}	m_{41}	4
	m_{34}	m_{33}	m_{32}	m_{31}	3
	m_{24}	m_{23}	m_{22}	m_{21}	2
	m_{14}	m_{13}	m_{12}	m_{11}	1
X_c	4	3	2	1	

Рис. 2. Пример матрицы свёртки размерностью 4×4
(примечание: здесь и далее начало координат
расположено в нижнем правом углу)

Матрица должна быть неубывающей, что может быть выражено следующим образом: $m_{rc} \leq m_{rc+1}$, $m_{rc} \leq m_{r+1c}$,

$\underline{m}_{rc} \leq \underline{m}_{rc+1}$, $\underline{m}_{rc} \leq \underline{m}_{r+1c}$, $\overline{m}_{rc} \leq \overline{m}_{rc+1}$, $\overline{m}_{rc} \leq \overline{m}_{r+1c}$. Помимо

этого в некоторых случаях на целочисленные матрицы свёртки накладывают дополнительное ограничение – разница между соседними по горизонтали и вертикали элементами не должна превышать единицу: $m_{rc+1} - m_{rc} \leq 1$, $m_{r+1c} - m_{rc} \leq 1$.

Предполагается, что для $\forall r, c$ элементы матрицы $m_{rc} \in [\underline{m}_{rc}, \overline{m}_{rc}]$ (рис. 3).

Определение. Матричный механизм нечёткого комплексного оценивания (ММНКО) – это механизм комплексного оценивания, который задаётся кортежем:

$$(3) \quad (G, M, Q, F, DF),$$

где в отличие от кортежа (2) дополнительно определяются P – подход к теоретико-множественным операциям над нечёткими множествами и процедура дефаззификации – DF , которая переводит нечёткие переменные на множество действительных значений.

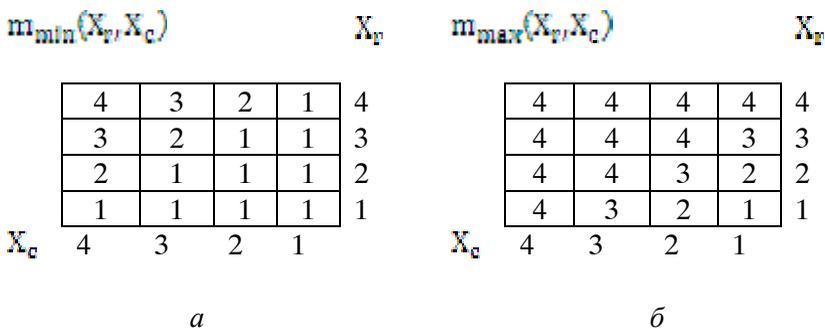


Рис. 3. Матрицы свёртки размерностью 4×4 :
 а – с минимально возможными элементами \underline{m}_{FC} ;
 б – с максимально возможными элементами \overline{m}_{FC} ;

В случае применения ММНКО для оценивания состояния сложного объекта могут применяться лингвистические и нечёткие переменные, т.е. сложный объект описывается в пространстве $\mathbf{o} \in \tilde{\mathcal{O}}$ (символ с тильдой далее будет означать применение

нечётких переменных и множеств) следующим вектором:
 $\mathbf{o} = \{\tilde{t}_q, \tilde{x}_n\}$, $q = \overline{1, \bar{q}}$, $n = \overline{1, \bar{n}}$, где $\tilde{t}_q = \{t_q / \mu_{t_q}\}$ – это нечёткое

множество, носителем которого является множество T_q , образованное набором термов t_q , каждому из которых поставлено в соответствие некоторое значение характеристической функции $\mu_{t_q} \in [0, 1]$ (с определёнными оговорками можно считать \tilde{t}_q аналогом лингвистической переменной), $\tilde{x}_n = \{x_n / \mu_{x_n}\}$ – это нечёткая переменная, носителем которого является действительно-значная шкала $\Phi_n \subseteq R^1$, каждому значению которой по-

ставлено в соответствие некоторое значение характеристической функции $\mu_{m_i} \in [0,1]$.

В этом случае задача комплексного оценивания с помощью ММНКО принимает вид установления отображения между пространством сложных объектов и нечётким множеством:

$$(4) \quad \text{ММНКО: } \mathcal{O} \rightarrow \mathcal{V}.$$

Дефаззификация необходима для сведения задачи (4) к (1):

$$(5) \quad \text{DF: } \mathcal{V} \rightarrow V \subset \mathbb{R}^1.$$

В случае нечёткого комплексного оценивания аргументы матрицы \tilde{m} представлены в нечётком виде, поэтому элемен-

там матрицы m_{ij} соответствуют по два значения функции

принадлежности. Для определения единственного значения функции принадлежности необходимо использовать теоретико-множественную операцию пересечения в соответствии с принципом обобщения Заде [15], который в общем случае для двух произвольных нечётких множеств записывается следующим образом:

$$(6) \quad \tilde{A} \cap (\cup) \tilde{B} = \{X_i / \mu_A \cap (\cup) \mu_B\},$$

где X_i – элемент носителей нечётких множеств, μ_A и μ_B – значения функций принадлежности элемента X_i каждому нечётко-

му множеству, $\cap (\cup)$ – операция пересечения (объединения).

Теоретико-множественную операцию объединения необходимо выполнять для элементов матрицы свёртки, имеющих одинаковые значения, которые образуют носитель свёртки в не-

чётком виде.

3. Комплексное оценивание с матрицами свёртки, элементы которых определены в нечётком виде

Элементы матрицы свёртки могут быть определены экспертом (группой экспертов [4]) как дискретные значения шкалы, что соответствует тому, что эксперты высказывают категорические суждения, так и используя теорию нечётких множеств в виде нечётких переменных, что соответствует модальным суждениям эксперта (группы экспертов).

Возможность построения матриц свёртки с нечёткими элементами описана в работе [15]. Там же в [15, с. 181–183] приводятся результаты вычислительного эксперимента и сравнение топологического представления матрицы, полученной в результате транзитивного замыкания на дереве комплексного оценивания [8] с матрицей, топологическое представление которой построено по элементам матрицы в нечётком виде. Близость полученных результатов свидетельствовала о возможности использования матриц свёртки с нечёткими элементами.

В [15] исследовался ММНКО, где процедура P – максимумин (7)–(8), поэтому в данной работе приведём результаты аналогичного исследования с применением аддитивно-мультипликативного [3] ММНКО (9)–(10).

$$(7) \quad \bar{A} \cap \bar{B} = \{X_i/\mu_A\} \cap \{X_i/\mu_B\} = \{X_i/\min(\mu_A, \mu_B)\},$$

$$(8) \quad \bar{A} \cup \bar{B} = \{X_i/\mu_A\} \cup \{X_i/\mu_B\} = \{X_i/\max(\mu_A, \mu_B)\},$$

$$(9) \quad \bar{A} \cap \bar{B} = \{X_i/\mu_A\} \cap \{X_i/\mu_B\} = \{X_i/\mu_A \cdot \mu_B\},$$

$$(10) \quad \bar{A} \cup \bar{B} = \{X_i/\mu_A\} \cup \{X_i/\mu_B\} = \{X_i/\mu_A + \mu_B\}.$$

Результат матричной свёртки будет представлен в виде нечёткой переменной:

$$(11) \quad X(X_r, X_c) = \{\underline{m}_{rc}/\underline{\mu}_{mrc}, \dots, \overline{m}_{rc}/\overline{\mu}_{mrc}\},$$

где $\{\underline{m}_{r,c}, \dots, \overline{m}_{r,c}\}$ – это деления шкалы $X \in Q \subset Q_{\sigma}$, описывающей свёртку факторов \tilde{X}_r и \tilde{X}_c , элементы матрицы $m_{r,c}$ принимают значения из этого интервала, $\mu_{m_{r,c}}$ определяется с помощью процедуры P .

Для представления результата свёртки в виде числа, принадлежащего множеству действительных чисел, в работах [15, 16] предлагается использовать уравнение центра масс, который с учётом принятых в данной работе обозначений примет вид:

$$(12) \quad \text{BF: } X_n = (\sum_{m_{r,c}} m_{r,c} \cdot \mu_{m_{r,c}}) / (\sum_{m_{r,c}} \mu_{m_{r,c}}).$$

Для перехода от действительных значений к нечётким переменным воспользуемся принятым в [15, 16] опущением, что функция принадлежности нечёткой переменной должна быть не нулевой только на паре ближайших дискретных значений шкалы оценивания и сумма значений функции принадлежности должна равняться единице.

Формально предложенную процедуры фаззификации можно записать следующим образом:

$$(13) \quad \tilde{X} = \{[X]/\mu_{[X]} = (1 - [X]); [X] + 1/\mu_{[X]+1} = [X]\},$$

где $[X]$ – целая часть переменной X , $[X]$ – остаток переменной X ,

значения функции принадлежности при других дискретных значениях шкалы Q равны нулю.

4. Пример комплексного оценивания с матрицами свёртки, элементы которых определены в нечётком виде

Пусть имеется 4-факторный ММНКО, граф которого имеет вид (см. рис. 1), а матрицы свёртки следующие (рис. 4):

$X(X_1; X_2)$	X_1	$X(X_3; X_4)$	X_3																																
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px 10px;">4</td><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">4</td><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> </table>	4	3	3	2	4	3	2	1	3	3	2	1	3	2	1	1	4 3 2 1	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px 10px;">4</td><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> </table>	4	3	2	1	3	3	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	4 3 2 1
4	3	3	2																																
4	3	2	1																																
3	3	2	1																																
3	2	1	1																																
4	3	2	1																																
3	3	2	1																																
2	2	2	1																																
1	1	1	1																																
X_2	4 3 2 1	X_4	4 3 2 1																																

а

б

$v(X_1; X_2; X_3; X_4)$	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px 10px;">4</td><td style="padding: 2px 10px;">4</td><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">3</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">4</td><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> </table>	4	4	3	3	4	3	2	2	3	3	2	1	3	2	1	1	$X(X_1; X_2)$
4	4	3	3															
4	3	2	2															
3	3	2	1															
3	2	1	1															
$X(X_3; X_4)$	4 3 2 1	4 3 2 1																

в

Рис. 4. Матрицы свёртки:

а – m_I ; б – m_{III} ; в – m_{III}

Пусть свойства факторов 3 и 4 будут заданы следующими нечёткими переменными: $\bar{X}_3 = \{1/0; 2/0; 3/0,8; 4/0,2\}$,

$\bar{X}_4 = \{1/0; 2/0; 3/0,4; 4/0,6\}$, что согласно (13) в дефаззифици-

рованном виде можно представить как $X_3 = 3,2$, а $X_4 = 3,8$.

Определим матрицу транзитивного замыкания при дискретных значениях факторов $X_1 = \{1, 2, 3, 4\}$ и $X_2 = \{1, 2, 3, 4\}$

(рис. 5). Для сокращения записи будем использовать запись элементов матрицы свёртки в дефаззифицированном виде.

$$v(X_1; X_2; X_3 = 3,2; X_4 = 3,8)$$

					X_1
	4,0	3,1	3,1	3,0	4
	4,0	3,1	3,0	2,1	3
	3,1	3,1	3,0	2,1	2
	3,1	3,0	2,1	2,1	1
X_2	4	3	2	1	

Рис. 5. Матрица транзитивного замыкания 4-факторного ММНКО при $X_3 = 3,2$, а $X_4 = 3,8$

С помощью аддитивно-мультипликативного подхода, вычислив комплексные оценки по полученной матрице на всей области определения X_1, X_2 , получим поверхность (рис. 6).

Если вычислить комплексные оценки, используя аддитивно-мультипликативный ММНКО $(G, M, Q, P_{Дж}, DF)$, при всех

значениях $X_1 = [1,4]$ и $X_2 = [1,4]$, которые фазсифицируются

согласно (13), а результат комплексного оценивания представить в дефазсифицированном виде согласно (12), то получим поверхность (рис. 7).

Сравнивая полученные зависимости комплексной оценки 4-факторного ММНКО от двух частных факторов (см. рис. 6) и 2-факторного ММНКО (см. рис. 7), видно, что незначительная разница между поверхностями есть, но погрешность по модулю не превышает 6,33 %.

На основании того, что удаётся построить 2-факторный ММНКО, приближенный к многофакторному механизму, можно сделать вывод, что для комплексного оценивания могут использоваться ММНКО с матрицами свёртки, элементы которых определены нечётко или непрерывной оценкой, которая может быть фазсифицирована. Это, в свою очередь, является основанием для того, чтобы применять процедуры активной экспертизы для определения матриц свёртки, в том числе нечёткой активной экспертизы [6].

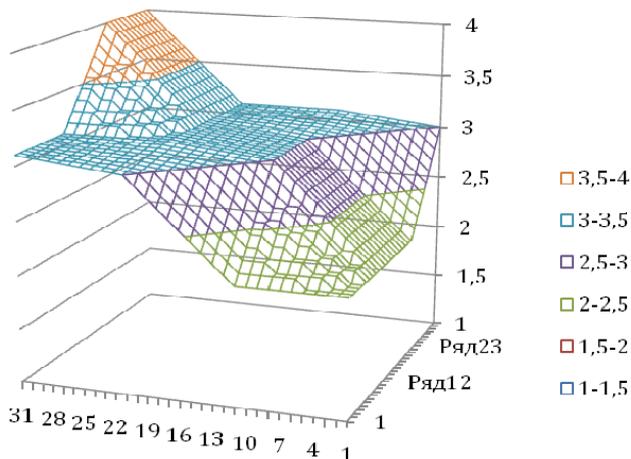


Рис. 6. Зависимость комплексной оценки 4-факторного ММНКО от двух частных факторов X_1 и X_2 , построенная с помощью аддитивно-мультипликативной ММНКО

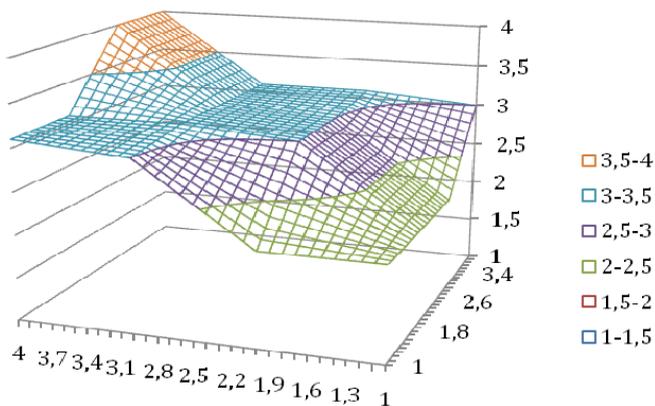


Рис. 7. Зависимость комплексной оценки 2-факторного ММНКО от двух частных факторов X_1 и X_2 , построенная по матрице транзитивного замыкания с помощью аддитивно-мультипликативной ММНКО

Литература

1. АЛЕКСЕЕВ А.О. *Исследование альтернативных подходов к теоретико-множественным операциям над нечеткими множествами в процедуре нечеткого комплексного оценивания* // Прикладная математика и вопросы управления. – 2015. – №1. – С. 60–72.
2. АЛЕКСЕЕВ А.О., АЛЕКСЕЕВА И.Е. *Процедуры нечёткого комплексного оценивания объектов различной природы* // Материалы XII Всерос. совещания по проблемам управления (ВСПУ 2014); г. Москва, 16–19 июня 2014 г. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2014. – С. 7884–7893
3. АЛЕКСЕЕВ А.О., КАЛЕНТЬЕВА А.С., ВЫЧЕГЖАНИН А.В., КЛИМЕЦ Д.В. *Алгоритмические основы нечеткой процедуры комплексного оценивания объектов различной природы* // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3/3. – С. 469–474.
4. АЛЕКСЕЕВ А.О., КОРГИН Н.А. *О применении обобщенных медианных схем для матричной активной экспертизы* // Прикладная математика, механика и процессы управления. – 2015. – Т.1. – С. 170–177
5. АНДРОНИКОВА Н.Г., ЛЕОНТЬЕВ С.В., НОВИКОВ Д.А. *Процедуры нечёткого комплексного оценивания* // Современные сложные системы управления: тр. между. науч.-пр. конф. – Липецк, 2002. – С. 7–8
6. АНДРОНИКОВА Н.Г., ЛЕОНТЬЕВ С.В., НОВИКОВ Д.А. *Механизмы нечёткой активной экспертизы* // Автоматика и Телемеханика. – 2002. – № 8. – С. 128–137.
7. АНОХИН А.М., ГУСЕВ В.Б., ПАВЕЛЬЕВ В.В. *Комплексное оценивание и оптимизация на моделях многомерных объектов*. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. Трапезникова РАН, 2003. – 79 с.
8. БЕЛЯКОВ А.Ю., ЕЛОХОВА И.В., МЕРСОН М.Э., ХАРИТОНОВ В.А. *Транзитивные замыкания на деревьях комплексного оценивания* // Управление большими системами. Вып. 9. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2004. – С.53–56

9. БУРКОВ В.Н., БУРКОВА И.В. [и др.] *Механизмы управления: мультифункциональное учеб. пособие* / под ред. Д.А. Новикова. – М.: УРСС, 2011
10. БУРКОВ В.Н., КОНДРАТЬЕВ В.В., ЦЫГАНОВ В.В., ЧЕРКАШИН А.М. *Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма*. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
11. ГЛЮТОВ В.А., ПАВЕЛЬЕВ В.В. *Векторная стратификация*. – М.: Наука, 1984. – 92 с.
12. ГУБКО М.В. *Модели и методы оптимизации структуры иерархических систем обработки информации*: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 05.13.01 / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова РАН. – М., 2014. – 372 с.
13. ЗАДЕ Л. *Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений* / пер. Н.И. Ринго, под ред. Н.Н. Моисеева и С.А. Орловского. – М.: МИР, 1976. – 167 с.
14. НОВИКОВ Д.А., СУХАНОВ А.Л. *Нечёткие сетевые системы комплексного оценивания* // Проблемы информационной экономики. Вып. 6: Моделирование инновационных процессов и экономической динамики. – М.: Ленанд, 2006. – С. 279–292.
15. ХАРИТОНОВ В.А., БЕЛЫХ А.А. *Технологии современного менеджмента* / под науч. ред. В.А. Харитонова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 190 с.
16. ХАРИТОНОВ В.А., ВИНОКУР И.Р., БЕЛЫХ А.А. *Функциональные возможности механизмов комплексного оценивания с топологической интерпретацией матриц свертки* // Управление большими системами: сб. трудов. – 2007. – №18. – С. 129–140.

MATRIX MECHANISMS OF COMPLEX ESTIMATION, THE ELEMENTS OF THE CONVOLUTION MATRICES OF WHICH ARE DEFINED IN THE FUZZY STATE

Aleksandr Alekseev, Perm National Research Polytechnic University, Cand.Sc. (alekseev@cems.pstu.ru)

Abstract: The problem of complex estimation of complex objects is defined, which means objects (a group of objects or a system) whose properties can be both numerical (quantitatively-measurable properties of the object) and non-numerical (qualitatively-described properties of the object) by means of matrix mechanisms of fuzzy complex estimation. The application of matrix mechanisms of complex estimation is shown, the elements of convolution matrices are defined in fuzzy form.

Keywords: complex objects, control mechanisms, complex estimation, convolution matrices, fuzzy complex estimation.

УДК 332.7:[519.86+657.922

ББК 65.223

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ДЛЯ ОТКРЫТИЯ МАГАЗИНА ШАГОВОЙ ДОСТУПНОСТИ

Клейменова А.А.¹

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Представлены краткие результаты исследований создания методики определения оптимального месторасположения магазинов формата шаговой доступности, основанной на модифицированной модели Хаффа и аддитивно-балльной свертки качеств торговых точек. Определены дальнейшие перспективы исследований.

Ключевые слова: коммерческая недвижимость; магазин шаговой доступности; оценка качества магазина; поиск оптимального месторасположения; гравитационные модели.

В современном мире рынок объектов коммерческой недвижимости в сфере ритейла захватывают и делят между собой торговые сети. Как следствие, обостряется конкурентная борьба между несколькими крупными игроками на этом рынке, что приводит к увеличению количества магазинов шаговой доступности (МШД), которые являются объектом исследования настоящей работы.

Именно из конкурентоспособности каждого магазина сети складывается картина её успешности. Ведь чем больше точка продажи продукции приносит дохода, тем больше прибыли получает сеть в целом. Прибыль магазина напрямую зависит от клиентопотока и покупаемости реализуемого товара. В связи

¹ Александра Андреевна Клейменова, магистр (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, For-s.a@ya.ru).

с этим возникает необходимость создания (определения) конкурентного преимущества.

Конкурентное преимущество – это положение объекта на рынке, позволяющее ему преодолевать силы конкуренции и привлекать потребителя [1].

Одним из важных характеристик привлекательности магазина является его месторасположение. С одной стороны, оно влияет на привлечение наибольшего числа покупателей и продажи продукции, что выгодно для торговой сети. С другой стороны, в зависимости от востребованности и спроса на территорию цена за месторасположение магазина может различаться в разы. Поэтому для фирм, работающих в розничной торговле, становится актуальным вопрос об определении «оптимального» места для размещения торговой точки. Под «оптимальным» в данном исследовании понимается такая система денежных потоков, при которой магазин, расположившийся на данной территории, получит максимальную прибыль. В связи с этим математическое моделирование прогнозирования посещаемости является востребованной процедурой при выборе местоположения МЖД.

Актуальность работы состоит в необходимости определения оптимального местоположения МЖД и более точного прогнозирования клиентопотока в условиях возрастающей конкуренции и территориальной концентрации объектов коммерческой недвижимости в зоне жилой застройки.

Исследования проводились с 2016 года, и более подробные результаты можно найти в работах [1, 2]. Ниже представлен их краткий обзор.

Проведен обзор основополагающих и оригинальных моделей по определению оптимального местоположения коммерческой недвижимости отечественных и зарубежных ученых. Исходя из этого, можно смело говорить о существующем многообразии подходов к решению данной проблемы.

Наиболее простой и понятной среди современных моделей определения оптимального месторасположения торгового объекта является модель Хаффа вследствие её простоты и применимости в течение долгого времени (данная модель применяется уже 60 лет). Однако при всех её плюсах она имеет ряд

недостатков, одним из которых является невозможность ее применения в современных условиях в первоначальном виде. Данная модель имеет ряд предпосылок, поэтому за основу взята модифицированная модель Хаффа, которая является общим случаем оригинальной модели.

В исследовании представлены модифицированная модель Хаффа и её корректировка для разработки методики определения оптимального месторасположения МШД. Определен и принят постоянным коэффициент, описывающий влияние времени корреспонденции потребителя, и создана методика по определению параметра качество МШД (Q). Разработаны содержательная, концептуальная и математическая постановки задач. Создана классификация задач по таким характеристикам, как:

- поиск места строительства нового объекта коммерческой недвижимости;
- поиск жилой недвижимости в существующих многоквартирных домах на первых и подвальных этажах с последующим переводом их в разряд коммерческой недвижимости;
- поиск перспективных мест из существующих объектов коммерческой недвижимости.

Также градация задач происходит, исходя из задаваемых параметров:

- местоположение (где должен находиться МШД?);
- качество (какого качества должны быть товары и услуги в МШД?);
- целевая аудитория (кто есть покупатель данного МШД?);
- категория товаров (что продаем в МШД?).

В настоящее время автором решены 6 из 12 поставленных задач. Стоит признать, что для решения оставшихся задач необходимо знать, какие группы потребителей проживают в каждом доме, а также товарный сегмент, выбираемый той или иной целевой аудиторией, для чего потребуются дополнительное трудоемкое социологическое исследование. Поэтому дальнейшее исследование целесообразно разбить на два последовательных этапа.

Решения первых 6 задач представлены в статьях [1, 2] с результатами использования их на практике в микрорайоне Октябрьский и Садовый города Перми.

В статьях [1, 2] представлены результаты практических исследований по сбору данных, их анализу, математической интерпретации и применимости методики определения оптимальности месторасположения МЩД, основанной на модифицированной модели Хаффа.

Сбор необходимых для решения данных проходил в два этапа:

1) сбор информации из интернет-ресурсов, учебников, статей, статистических данных, работа с ГИС-системами;

2) натурные исследования: определение параметра «Качество магазина» (согласно разработанной методике 8 критериев) путем бинарной свертки согласно мнениям экспертов; поиск и определение координат МЩД, не отраженных в ГИС-системах, подсчет квартир во всех жилых домах микрорайона.

Для наглядности результаты исследований представлены с применением графических систем.

Исходя из полученных данных, можно смело говорить об их соответствии реалиям, предлагая данную методику как инструмент определения оптимального месторасположения МЩД. Так же, опираясь на результаты, можно говорить о несовершенстве модели из-за сложности сбора данных и ограничений по количеству ячеек при составлении таблиц математических вычислений.

В качестве будущих исследований предлагается сделать апробацию модели на центральных районах города Перми для определения погрешностей, которые вызваны размытыми географическими границами, и рассмотрения поведения модели в более конкурентной среде. Также предлагается в последующих исследованиях ввести коэффициенты, отвечающие за определение целевой аудитории и категории товаров.

Для разработки данного типа задач возможно привлечение профессиональных исследователей-социологов и статистов. Предполагается разработка ГИС-системы для упрощения вычислений и сбора данных и, как следствие, сокращения временных издержек.

Завершением данного исследования считаю создание программы для ЭВМ, с помощью которой возможно обоснование

определения оптимального местоположения любых объектов коммерческой недвижимости, которая востребована специалистами в сфере ритейла.

Данные перспективы планируется разрабатывать в рамках программы аспирантуры.

Литература

1. АЛЕКСЕЕВ А.О., КЛЕЙМЕНОВА А.А., СПИРИНА В.С. *Постановки задач выбора места для открытия магазина формата шаговой доступности // Прикладная математика и вопросы управления. – 2017. – № 1. – С. 47–60.*
2. АЛЕКСЕЕВ А.О., КЛЕЙМЕНОВА А.А., СПИРИНА В.С. *Обоснование места для открытия магазина шаговой доступности (на примере микрорайона Октябрьский города Перми) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 1 (25). – С. 58–68.*

THE RESULTS OF STUDIES OF THE DEVELOPMENT OF METHODOLOGY TO OPEN A CORNER STORE AND DETERMINATION OF PROSPECTS OF ITS

Klejmenova Aleksandra (Perm, Russian Federation) – Master Student at the Department «Construction engineering and materials science», Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: for-c.a@yandex.ru).

Abstract: Examines the problem of finding the optimal location for opening and/or construction of the store format walking distance. The solution to this problem is included in the competence of specialists in the selection of retail property. As a method of solving the problem the approach based on the assessment of the consumer appeal of the property using the modified Huff model. The modified Huff's model is function of many variables, which are individual for each type and size of commercial real estate. the Criterion of effi-

ciency of the store's opening consider the maximum expected number of visitors in the assumption that the maximum visitors will provide a maximum profit of economic entities engaged in entrepreneurial activities on the basis of shop within walking distance. Therefore, the problem of location search has been formulated as a constrained optimization problem with constraints on the sets of admissible values of controlled variables. In detail displays the objective function and provides the assumptions that were taken into account when solving the investigated problem. The solution to the problem of finding optimal locations for opening and/or construction of the store format walking distance is demonstrated on the example of the Oktyabrsky and Sadovy microdistrict of the Perm city. Calculated data should be considered with the use of geographic information systems, allowing you to visually compare the solutions of the studied problems.

Keywords: commercial property; corner store; quality evaluation of shop; search of an optimum location; gravitational models.

УДК 519
ББК 22.17

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПОДСИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ¹

Харитонов М.А.²

(Волгоградский государственный университет, Волгоград)

Предложен алгоритм численного решения задачи структурно-параметрического синтеза оптимальных структур, описываемых n -дольными иерархическими графами и порожденными подграфами с рекурсивно определенными структурнозависимыми целевыми функциями, представимыми в виде суперпозиций элементарных целевых функций, заданных в их вершинах. является задачей выпуклого программирования. Оптимальная структура отвечает оптимальной размерности семейства задач выпуклого программирования, осуществляющих оптимизацию потоков на каждой фиксированной структуре. Создан алгоритм автоматического вывода необходимых уравнений и неравенств для этого семейства задач. На основе этого алгоритма созданы модели оптимизации иерархическими структурами производственных подсистем предприятий со структурно-зависимыми производственными функциями леонтьевского типа в условиях неопределенности.

Ключевые слова: производственная подсистема, иерархический n -дольный граф, оптимизация структуры, параметрическое линейное программирование, управление потоками, производственная функция Леонтьева, иерархическая структура.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 16-48-340147.

² Михаил Алексеевич Харитонов, младший научный сотрудник, (kharitonov.mihail@gmail.com).

1. Введение

Задачи оптимизации и управления системами с потоками имеют многочисленные содержательные интерпретации и практически важные приложения. Среди них можно выделить транспортные (в том числе водные, газотранспортные, нефтепроводные) энергетические телекоммуникационные системы, системы производства с потоками факторов производства. На фоне большого числа моделей и методов управления потоками задачам управления структурой потоковых систем уделяется сравнительно мало внимания. Исключением являются задачи оптимизации структуры телекоммуникационных и компьютерных сетей, основанные на методах теории массового обслуживания. Между тем, очевидно, что эффективное управление структурой потоковых систем расширяет область поиска оптимальных решений и снижает затраты на функционирование избыточных неизменяемых структур. Возможность управления структурой лежит в основе адаптивности всех систем, обеспечивая их эффективное функционирование в условиях внешних и внутренних изменений.

Среди авторов содержательных математических моделей оптимизации и управления иерархическими структурами можно выделить Barnett W.P. и Carroll G.R. [16], Новиков Д.А. [1, 10], Воронин А.А. и Мишин С.П. [3, 4], Губко М.В. [6, 7, 8, 19], Рожихин П.В. [11, 13, 13], Юдицкий С.А. [15]. Следует отметить также результаты исследования оптимальности проектируемых структур в технических системах Sheu C.Y. и Prager W. [21], Yang W.H. [22], Губко М.В. [18], Сафронов В.В. [2], Цирлин А.М. [14].

Процесс структурного синтеза производственных систем традиционно делится на следующие три этапа: определение технологии, построение структуры и механизмов управления. При очевидных достоинствах подхода также очевидны его ограничения. Во-первых, в условиях глобального инновационного процесса период стационарности технологической структуры постоянно сокращается, и частые изменения технотрактуры происходят при постоянной организационной структуре и механизмах

управления. Во-вторых, механизмы функционирования многих предприятий существенно ограничены внешними экономическими, институциональными, социальными факторами, затрудняющими процесс преобразований. Предположение о стационарности структуры производственной подсистемы не позволяет строить другие подсистемы предприятий, облегчающие ее перестроения, что снижает потенциал их адаптивности. Указанные ограничения актуализируют задачи оптимизации и оптимального управления технологической структурой предприятий.

Адаптационные свойства предприятий учитываются в макроэкономической производственной функции (ПФ) неявно через свойство эластичности ПФ по факторам производства, которое можно объяснить как неявным учетом многообразия эффективных неадаптивных технологий, так и адаптивными свойствами последних. В микроэкономическом моделировании, где высокоспециализированный вид ПФ позволяет вычленять роль отдельных элементов технологической (и потенциально — управленческой) структуры, традиционно предполагается неизменность структурно-функциональной модели предприятий, что также не позволяет напрямую анализировать адаптационные их свойства. Использование структурнозависимых производственных функций в задачах структурной оптимизации позволяет исследовать обусловленность адаптационных процессов предприятий от параметров их внутренней и внешней среды.

2. Оптимальный простой преобразователь

В качестве элементарной ПФ каждого элемента производственной подсистемы предприятия с неизменной технологией (простого преобразователя — ПП) используется ПФ Леонтьева [9]:

$$(1) \quad F = k \min \left(\frac{R_1}{a_1}, \frac{R_2}{a_2}, \dots, \frac{R_m}{a_m} \right),$$

где R_i — величины аргументов — трансформационных факторов производства, a_i — технологические коэффициенты, k — нормирующий множитель, выбираемый так, чтобы максимальное зна-

чение ПФ равнялось сумме величин ее аргументов (например, $k = \sum_{i=1}^m a_i$). Использование m -факторной модели позволяет учитывать векторную природу макроэкономических факторов производства.

Задача оптимизации (1) имеет вид задачи ЛП [9]:

$$(2) \quad F \rightarrow \max_{\{R_i\}_{i=1}^m}, -\frac{kR_1}{a_i} + F \leq 0, i = \overline{1, m}.$$

и очевидное решение $R_i = \frac{\sum_{i=1}^m R^i a_i}{k}$, $F = \sum_{i=1}^m R^i$. То есть ПФ оптимального ПП в нашем случае равна сумме ее аргументов. На рис. 1 приведена структурная схема ПП, на рис. 2 графики ПФ ПП (при $m = 3$).

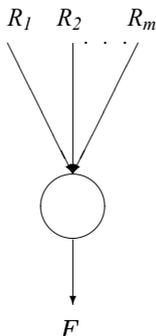


Рис. 1. Простой преобразователь

Очевидно, что в условиях устойчивых межфакторных диспропорций или флуктуаций трансформационных факторов среднее значение ПФ ПП значительно ниже ее максимума. Свойство эластичности по аргументам (входам) появляется в специализированном преобразователе (СПП) — последовательности нескольких вспомогательных ПП, производящих при необходимости недостающую часть одного из факторов производства для

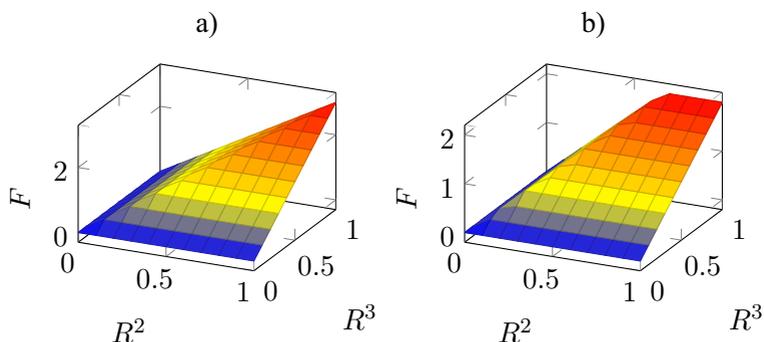


Рис. 2. График $F(1, R^2, R^3)$ а) $a_1 = a_2 = a_3 = 1$; б) $a_1 = 1; a_2 = 2; a_3 = 3$.

достижения максимальной эффективности (последнего в цепочке) базового ПП, отвечающего основному производству. Эластичность СП по входам растет вместе с длиной цепочки до достижения максимума при некоторой ее (конечной) длине.

3. Задача оптимизации структуры специализированного преобразователя в условиях определенности

3.1. Постановка задачи оптимизации структуры специализированного преобразователя в условиях определенности

В качестве математической модели структуры производственной подсистемы используются полные n -дольные иерархические графы (универсальные преобразователи — УП [20]) и порожденные подграфы [5] (например, специализированные преобразователи — СП). Один из таких СП приведен на рис. 3.

Определение 1. Пусть $A \subset V$ и $B \subset V$ непустые множества вершин графа $G(V, E)$, такие что $A \cap B = \emptyset$. Обозначим через $[A, B]$ множество дуг, таких что для каждой вершины $a \in A$ существуют дуга $(a, b_i) \in E$, $i = \overline{1, |B|}$.

Определение 2. Специализированным преобразователем ($Cn\bar{I}$) будем называть граф $G(V, E)$, где

$$V = \{N \cup \{D_i\}_{i=1}^n \cup \{\{R_j^i\}_{i=1}^n\}_{j=1}^m \cup N_b\},$$

$$E_{S_1} = \{\{N \cup \{\{R_j^i\}_{i=1}^n\}_{j=1}^m, \{D_i\}_{i=1}^n\}, \{\{D_i\}_{i=1}^n, \{D_j\}_{j=i+1}^n \cup N_b\}\}.$$

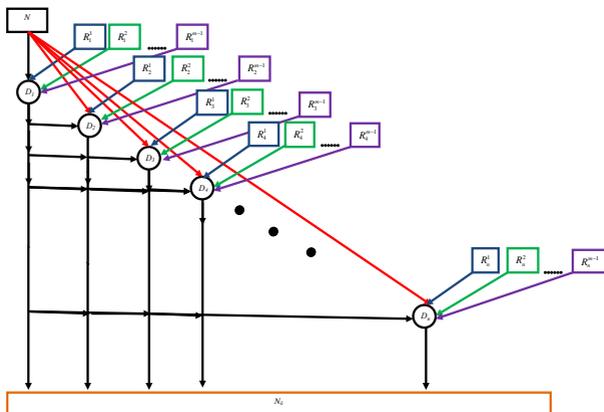


Рис. 3. Структура специализированного преобразователя

Структурные технологические элементы производственной подсистемы предприятия (III_i) ($i = \overline{1, n}$) совершают одинаковые качественные преобразования факторов (N, R^1, \dots, R^{m-1}) различными взаимозаменяемыми технологиями. Процесс вспомогательного производства разбивается на n этапов (по длительности одной работы или по содержательному смыслу сложной работы). Каждый III_i имеет одинаковое качественное содержание своих факторов (т.е. их мера отражает количественный смысл) и поэтому может выполнять как все этапы работ, так и любую его часть.

Величина фактора (N) означает меру качества некоторого (планового) количества X этого фактора $N = \sum_{i=1}^n N_i^0 = \sum_{i=1}^n NX_i^0$. Т.е. разделение величины фактора на части, направляемые на обработку в различные III_i на самом означает, что выполняется разделение его количества.

Разделение величины NX_i результата работы III_i на ве-

личину NX_b^i , направляемую непосредственно в базовый $ПП$, и на величину NX_k^i , направляемую в $ПП_k$ $k = \overline{i+1, n}$, означает, что общая входная величина фактора $NX_i^0 + NX_i^j$ $j = \overline{1, i-1}$ преобразователя $ПП_i$ разделена в нем на части NX_b^i и NX_k^i . Часть NX_b^i является общим результатом циклов: $j > n$, $j = \overline{1, i-1}$, а часть NX_k^i является общим результатом других циклов: $j > i$, $j = \overline{1, i-1}$.

Замечание. Производительность $ПП_i$ вообще говоря зависит от фактических объемов работ по каждому из технологических циклов $j > n$, $j = \overline{1, i-1}$, $j > i$, $j = \overline{1, i-1}$, т.е. от величин $NX_i^0, NX_i^j, NX_b^i, NX_k^i$, $k = \overline{i+1, n}$. Однако в рамках модели технологические коэффициенты a_i^j преобразователей $ПП_i$ считаются постоянными, подразумевая для всей величины NX_i^0, NX_i^j , $j = \overline{1, i-1}$ выполнение всех этапов работы, тем самым завышая фактические затраты на их выполнение. С другой стороны, модель явно не учитывает затраты на организацию указанных выше четырех технологических циклов.

Целевая функция N_b для СпП (см. рис. 3) задается следующими соотношениями:

$$(3) \quad \sum_{i=1}^n N_i^0 = N; \quad \sum_{i=1}^n R_i^j = R^j, \quad j = \overline{1, m-1};$$

$$(4) \quad \sum_{j=i+1}^n N_j^i + N_F^i = \sigma_i \min \left(\frac{\sum_{l=0}^{i-1} N_i^l}{a_i^0}, \frac{R_i^1}{a_i^1}, \dots, \frac{1}{a_i^{m-1}} R_i^{m-1} \right),$$

$i = \overline{1, n-1}$,

$$(5) \quad N_F^n = \sigma_n \min \left(\frac{\sum_{l=0}^{n-1} N_n^l}{a_n^0}, \frac{R_n^1}{a_n^1}, \dots, \frac{R_n^{m-n}}{a_n^{m-1}} \right)$$

$$(6) \quad N_b = \sum_{i=1}^n \rho_i N_F^i$$

Из переменных системы (3)-(6) составим вектор факторных потоков

$$(7) \quad \varphi(n, m) = \left(\{ \{ N_i^j \}_{i=j+1}^n \}_{j=0}^{n-1}, \{ \{ R_i^l \}_{i=1}^n \}_{l=1}^{m-1}, \{ N_F^i \}_{i=1}^n \right),$$

Оптимальная структура СпП, описываемого системой (3)-(6), является решением следующей задачи параметрического линейного программирования

$$(8) \quad N_b = (\hat{\rho}, \varphi) \rightarrow \max_{\varphi(n,m),n},$$

$$\sum_{j=1}^{p(n,m)} M(n, m)_{ij} \varphi(n, m)_j \leq \beta_i, i = \overline{1, u(n, m)},$$

$$\beta = (N, R^1, R^2, \dots, R^{m-1}, 0, \dots, 0)^T.$$

$n^* = \min \left(\arg \max_n \varphi_F(n) \right)$, где $\varphi_F(n)$ — решение задачи (8).

Общее количество ограничений (неравенств) $u(n, m)$ задачи ЛП (8) состоит из распределения исходных факторов производства по структуре производственной подсистеме предприятия (всего m — ограничений), распределение промежуточных факторов по структуре СП (в каждой вершине иерархического графа структуры производственной подсистемы предприятия по m — ограничений): (4)-(5) — $m(nm + 1)$ ограничений:

$$u(n, m) = m(n + 1).$$

Общее число переменных $p(n, m)$ в задаче линейного программирования (8) равно количеству дуг соответственного иерархического графа $|E|$:

$$\begin{aligned} p(n, m) = |E| &= \sum_{v \in V} d(v) = \\ &= d(N) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} d(R_i^j) + \sum_{i=1}^n d(D_i) = \\ &= n + (m-1)n + \frac{n(n+1)}{2} = \frac{n(n+2m+1)}{2}. \end{aligned}$$

где $d(v)$ — число дуг с началом в вершине v .

3.2. Решение задачи оптимизации структуры специализированного преобразователя в условиях определенности

Обозначим $\lambda = \frac{N_b}{N + \sum_{i=1}^{m-1} R^i}$. Внешними параметрами зада-

чи (8) являются исходные межфакторные пропорции $N : R^i N : R^j N$ ($i, j = \overline{1, m-1}$) и пропорции технологических коэффициентов $a_k^l : a_k^d$ ($k = \overline{1, n}$, $d, l = \overline{0, m-1}$).

Результаты решения задачи (8) для некоторых значений переменных N , $R^i N$ ($i = \overline{1, m-1}$) и параметров a_k^l принимающих случайные значения из отрезка $K \subset R^+$ представлены на рис. 4.

4. Задача оптимизации структуры специализированного преобразователя в условиях неопределенности

4.1. Постановка задачи оптимизации структуры специализированного преобразователя в условиях неопределенности

Построение иерархической структуры производственной подсистемы предприятия и управление факторными потоками на этой структуре с одной стороны придает структуре производственной подсистемы адаптивные свойства, с другой — вносит неопределенность в зависимость ее ПФ от аргументов, что подчеркивает ее параметрическую зависимость от качества управления. Управление структурой производственной подсистемой предприятия содержит неизбежные погрешности, проявляющиеся в отклонении величин факторных потоков от оптимальных. Природа погрешности заключается в неотслеживании постоянных объективных изменений внутренней среды предприятия и неидеальной системой управления. Суммарная погрешность складывается из-за информационной погрешности, погрешности планирования и реализации планов. Их учет в рамках концепции детерминизма приводит к замене величин технологических коэффициентов a_{jk}^i величинами $\hat{a}_{jk}^i = a_{jk}^i(1 \pm \varepsilon_i)$, где ε_i — случай-

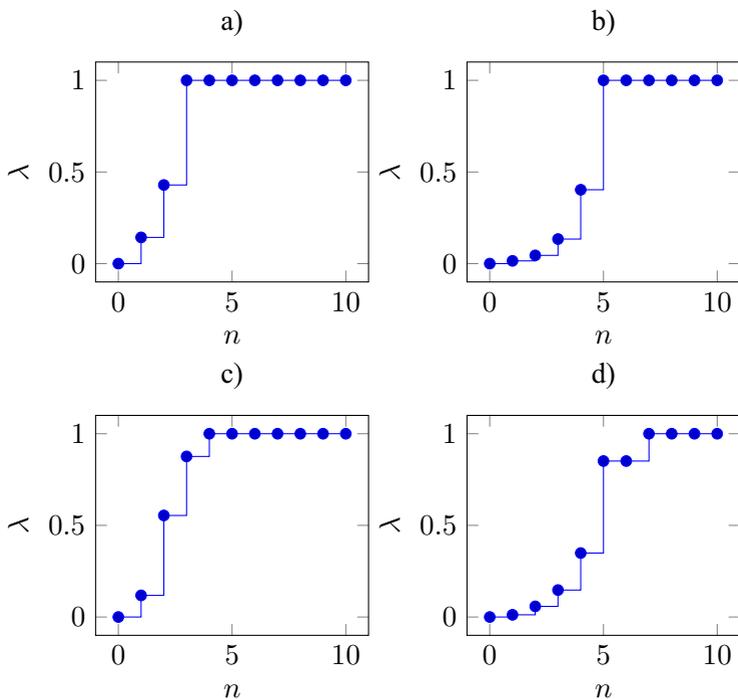


Рис. 4. График зависимости λ от числа уровней n при $m = 3$:
 а) $N = 0.1$; $R^1 = 1$; $R^2 = 1$; $K = \{1\}$; $n^* = 3$; б) $N = 0.01$;
 $R^1 = 1$; $R^2 = 1$; $K = \{1\}$; $n^* = 5$; в) $N = 0.1$; $R^1 = 1$; $R^2 = 1$;
 $K = [1, 5]$; $n^* = 4$; д) $N = 0.01$; $R^1 = 1$; $R^2 = 1$; $K = [1, 5]$;
 $n^* = 7$;

ная величина (параметр, характеризующий неопределенность) ,
 $(i = \overline{1, n-1}, j = \overline{i+1, n}, k = \overline{1, m})$.

Значение целевой функции $N_{b\varepsilon}$ для СП в условиях неопределенности является решением системы (9)-(11), где $N_i^0, N_F^0, R_i^j N$ ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m-1}$) компоненты вектора $\varphi^*(n, m)$ (решение задачи (8)).

(9)

$$\sum_{j=i+1}^n \hat{N}_j^i + \hat{N}_F^i = \sigma_i \min \left(\frac{N_i^0 + \sum_{l=1}^{i-1} \hat{N}_i^l}{a_i^0(1 \pm \varepsilon_i)}, \frac{R_i^1}{a_i^1(1 \pm \varepsilon_i)}, \dots, \frac{R_i^{m-1}}{a_i^{m-1}(1 \pm \varepsilon_i)} \right)$$

$i = \overline{1, n-1}$,

(10)

$$N_F^n = \sigma_n \min \left(\frac{N_n^0 + \sum_{l=1}^{n-1} N_n^l}{a_n^0(1 \pm \varepsilon_n)}, \frac{R_n^1}{a_n^1(1 \pm \varepsilon_n)}, \dots, \frac{R_n^{m-n}}{a_n^{m-1}(1 \pm \varepsilon_n)} \right),$$

(11)

$$N_{b\varepsilon} = \sum_{i=1}^n \rho_i \hat{N}_F^i.$$

4.2. Решение задачи оптимизации структуры специализированного преобразователя в условиях неопределенности

Обозначим $\lambda_\varepsilon = \frac{N_{b\varepsilon}}{N + \sum_{i=1}^{m-1} R^i}$.

Результаты решения задачи (9)-(11) для некоторых значений переменных N , $R^i N$ ($i = \overline{1, m-1}$), параметров a_k^l принимающих случайные значения из отрезка $K \subset R^+$ и некоторых значений параметра $\varepsilon = \varepsilon_j$ ($j = \overline{1, n}$) представлены на рис.5.

Заключение

Исследование найденных оптимальных структур и оптимальных режимов управления производственной системой предприятия позволяют сделать следующие выводы:

- поиск оптимальной структуры производственной системы с целевой функцией представимой в виде суперпозиции элементарных производственной функций леонтьевского типа,

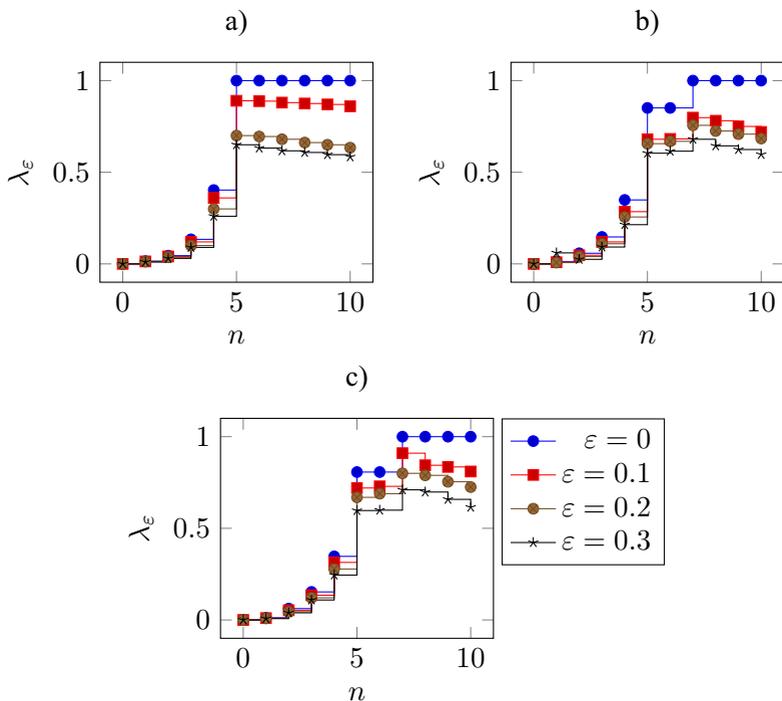


Рис. 5. График зависимости λ_ϵ от числа уровней n при $m = 3$, $N = 0.01$, $R^1 = 1$, $R^2 = 1$: а) $K = \{1\}$; б) $K = [1, 5]$; в) $K = [1, 10]$;

заданных в вершинах структурного графа, сводится к решению семейства задач линейного программирования с изменяющимся числом переменных и балансовых соотношений;

- оптимальная структура производственной системы определяется нормативными и фактическими пропорциями факторов производства;
- рост меры отклонения фактических пропорций факторов производства от нормативных величин ведет к росту сложности оптимальной структуры;

- рост неравномерности факторных пропорций элементарных производств ведет к росту сложности оптимальной структуры;
- рост неопределенности в оценке фактических и плановых пропорций факторов производства ведет к снижению сложности оптимальной структуры;

Литература

1. БУРКОВ В.Н., ГУБКО М.В., КОРГИН Н.А., НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами и другие науки об управлении организациями* // Проблемы управления. — 2012. — № 4. — С. 2–10.
2. ВЕДЕРНИКОВ Ю.В., КРАВЦОВ А.М., САФРОНОВ В.В., УМЕРЕНКОВ С.А. *Методика оптимизации сложных технических систем в условиях риска* // Информационно-управляющие системы. — 2007. — № 1. — С. 40–45.
3. ВОРОНИН А.А., МИШИН С.П. *Оптимальные иерархические структуры* // М.: ИПУ РАН, 2003. — 214 с.
4. ВОРОНИН А.А., МИШИН С.П. *Алгоритмы поиска оптимальной структуры организационной системы* // Автоматика и телемеханика, 2002, № 5.
5. ВОРОНИН А.А., ХАРИТОНОВ М.А. *Модель численной оптимизации структуры операционного ядра организации* // Управление большими системами. Выпуск 39. М.: ИПУ РАН, 2012. С.165–183
6. ГУБКО М. В. *Структура оптимальной организации континуума исполнителей* // Автоматика и телемеханика. — 2002. — № 12. — С. 116–130.
7. ГУБКО М. В. *Поиск оптимальных организационных иерархий при однородных функциях затрат менеджеров* // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 1. — С. 97–113.
8. ГУБКО М. В. *Алгоритмы построения субоптимальных организационных иерархий* // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 1. — С. 162–179.

9. КЛЕЙНЕР Г.Б. *Производственные функции. Теория, методы, применение.* // М.: Финансы и статистика, 1986. - 239 с.
10. НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами.* // М.: Физматлит, 2007. - 584 с.
11. РОЖИХИН П.В. *О поиске оптимальной траектории преобразований графа организации* // Управление большими системами. — 2004. — Вып. 6. — С. 105–116.
12. РОЖИХИН П.В. *О траекториях преобразования структуры организационных систем* // Управление большими системами. — 2004. — Вып. 9. — С. 190–200.
13. РОЖИХИН П.В. *Оценка мощности пространства состояний иерархической структуры* // Управление большими системами. — 2005. — Вып. 11. — С. 75–80.
14. ЦИРЛИН А. М. *Об оптимальной организации систем нагрева и охлаждения* // Теоретические основы химической технологии. — 2012. — Т. 46, № 1. — С. 109.
15. ЮДИЦКИЙ С.А. *Триадно-сетевые дорожные карты развития систем* // Управление большими системами. — 2013. — 29 Вып. 42. — С. 55–74
16. BARNETT W. P., CARROLL G.R. *Modeling Internal Organizational Change* // Annual Review of Sociology. — 1995. — Vol. 21. — P. 217–236.
17. BLAND R.G. *New finite pivoting rules for the simplex method* // Mathematics of Operations Research. — 1977. — Vol. 2, №2 — P. 103-107.
18. DANILENKO A.I., GOUBKO M.V *Semantic-aware optimization of user interface menus* // Automation and Remote Control. — 2013. — Vol. 74, № 8. — P. 1399-1411.
19. GOUBKO M. *Optimal organizational structures for change management in production* // Intelligent Systems Reference Library. — 2016. — Vol. 98. P. 59-83
20. KHARITONOV M., SVETLOV A., VORONIN A. *Operating core of an organizational system: optimal control of support structure* // International Journal of Pure and Applied

Mathematics, vol. 107, No. 4 (2016), p. 889 - 901

21. SHEU C. Y., PRAGER W. *Recent developments in optimal structure design* // Applied Mechanics Reviews. — 1968. — Vol. 21, № 10. — P. 985–992.
22. YANG W.H. *On a class of optimization problems for framed structures* // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 1978. — Vol. 15, iss. 1. — P. 85–97.

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF THE PRODUCTION SUBSYSTEM OF THE ORGANIZATION UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

Mikhail Kharitonov, Volgograd State University, Volgograd, junior researcher (kharitonov.mihail@gmail.com).

Abstract: We introduce an algorithm for numerical solution of the problem for structurally-parametric synthesis of optimal structures described by n-graded hierarchical graphs and generated by subgraphs with recursively defined structurally-dependent objective functions that can be represented as superpositions of elementary objective functions given at their vertices. The optimal structure corresponds to the optimal dimension of a family of convex programming problems that perform stream optimization on each fixed structure. We create an algorithm for automatic derivation of necessary equations and inequalities for this family of problems. On the basis of this algorithm, we construct an optimization models for the hierarchical structures of production subsystems of enterprises with structurally dependent production functions of the Leontief type under conditions of uncertainty

Keywords: production subsystem, hierarchical n-graded graph, structure optimization, parametric linear programming, flow control, Leontyev production function, hierarchical structure.

3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ. МЕХАТРОННЫЕ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, КОМПЛЕКСЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 519.854.2 + 658.5
ББК 65.290-2

МНОГОРЕСУРСНАЯ ЗАДАЧА ЦЕХОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ: ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ

Лазарев А.А.¹, Некрасов И.В.²

*(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
РАН, Москва)*

В статье обсуждаются две базовых постановки задачи планирования при ограниченных ресурсах (RCPSP): для непрерывного и дискретного времени. Обе постановки изначально сформулированы для случая планирования операций, задействующих ресурс только одного типа (например, станки). Рассматривается расширение постановок на случай нескольких типов ресурсов (например, станки, персонал, оснастка, расходный материал и т.п.). Проведена сравнительная оценка обеих моделей для многоресурсного случая с точки зрения применимости, простоты адаптации и возрастания вычислительной трудоемкости применяемых алгоритмов планирования.

Ключевые слова: RCPSP, задача цехового планирования, MES-система, многоресурсное планирование, целочисленное линейное программирование (ЦЛП), вычислительная трудоемкость.

¹ Александр Алексеевич Лазарев, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией 68 (jobmath@mail.ru).

² Иван Васильевич Некрасов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории 68 (ivannekr@mail.ru).

1. Введение

Решение задачи планирования в различных ее вариациях является центральной проблемой управления на современном предприятии [1, 5]. Плановые службы в обязательном порядке присутствуют в штатном расписании любого промышленного предприятия, осуществляя разработку и контроль исполнения планов различного уровня. Процесс планирования, как правило, разбивается по уровням: общий долгосрочный стратегический план, генерируемый на уровне ERP-систем [3], детализируется затем по подразделениям и отдельным ресурсам в MES-системах [8, 9], после чего на местах осуществляется его исполнение и оперативная корректировка (в случае необходимости). Наиболее детальная и трудоемкая часть процесса планирования осуществляется на среднем, так называемом «цеховом», уровне в упомянутых выше MES-системах. Причина повышенной сложности задачи цехового планирования кроется в необходимости выполнять поставленные на более высоком уровне общие цели, с одной стороны, и учитывать локальные (цеховые) ограничения, с другой стороны. Таким образом, в отличие от ERP-уровня, где применимы упрощенные модели стратегического объемного планирования [6], в задаче планирования MES-уровня используются полные модели календарного планирования, дополнительно учитывающие последовательность технологических операций и их распределение по ресурсам (людям, станкам и т.п.) [1]. Ранее авторами были проанализированы математические модели цехового планирования для операций, задействующих ресурс одного типа (например, станки). Однако в ходе практической апробации моделей выяснилось, что на реальном производстве массово распространенным является случай, когда каждая операция одновременно задействует несколько ресурсов разных типов [4, 8, 9] (станки, персонал, оснастка, расходный материал и т.п.). Исследования, проведенные в рамках данной работы, показывают, как изменяются постановки и модели планирования при введении ресурсов нескольких типов.

2. Модели одноресурсной задачи цехового планирования

С точки зрения математической формализации задача цехового планирования относится к классу RCPSP (Resource-constrained Project Scheduling Problem), являясь его прикладным частным случаем [6]. Математические модели задачи RCPSP применительно к цеховому уровню планирования могут быть сгруппированы по типу временной шкалы – задачи с непрерывным и с дискретным временем [7]. Краткие постановки задач приведены ниже [7].

2.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Для указанных типов моделей используются общие исходные данные, характеризующие производственные понятия и процессы. Список используемых понятий и обозначений приведен ниже:

– работа цеха осуществляется с использованием однотипных ресурсов (например, станков), множество которых обозначено $R = \{R_r\}$, $r = 1, \dots, R$;

– технологический маршрут выпуска конечного изделия цеха задан множеством технологических операций J , упорядоченных в виде ориентированного графа, который описан матрицей $G = \langle g_{ij} \rangle$, $i = 1, \dots, J$, $j = 1, \dots, J$. Элемент матрицы $g_{ij} = 1$, если операция j в технологическом маршруте следует за операцией i . Во всех остальных случаях элемент $g_{ij} = 0$;

– каждая операция i характеризуется списком ресурсов $\{r_k\}_i$, $k \in Z$, которые привлекаются для ее выполнения, и длительностью τ_i ;

– использование ресурсов по всем операциям представлено матрицей $Op = \langle op_{ir} \rangle$, $i = 1, \dots, J$, $r = 1, \dots, R$. Элемент матрицы $op_{ir} = 1$, если операция i в технологическом маршруте использует ресурс r . Во всех остальных случаях элемент $op_{ir} = 0$;

Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами

– задание F на производство партии конечного продукта носит название «заказ цеха» и характеризуется двумя величинами: объемом заказа в штуках конечного продукта v_f и директивным сроком заказа d_f (здесь $f = 1, \dots, F$).

2.2. ЗАДАЧА В НЕПРЕРЫВНОМ ВРЕМЕНИ

В непрерывном времени переменными задачи планирования выбираются моменты начала каждой i -й операции каждого f -го заказа $x_{if} \geq 0$ ($i = 1, \dots, J$; $f = 1, \dots, F$) [3,7]. Переменные $x_{if} \geq 0$ объединим в F векторов $\vec{x}_f \geq 0$. Ограничения задачи представлены матричными неравенствами [7]:

– соблюдение последовательности операций технологического процесса:

$$(1) \quad G \cdot \vec{x}_f \geq (\vec{x}_f + \vec{\tau}), \quad f = 1, \dots, F;$$

– упорядочение одноименных операций различных заказов с целью исключения конфликтов на ресурсах:

$$(2) \quad \vec{x}_{(f+1)} \geq \vec{x}_f + \vec{\tau}, \quad f = 1, \dots, (F-1);$$

– объединение одноименных операций разных заказов в группы и упорядочивание полученных групп на каждом ресурсе с целью исключения конфликтов на ресурсах:

$$(3) \quad Op \cdot G \cdot \vec{x}_1 \geq Op \cdot (\vec{x}_f + \vec{\tau});$$

– соблюдение директивных сроков всех заказов:

$$(4) \quad x_{jf} + \tau_j \leq d_f, \quad f = 1, \dots, F.$$

2.1. ЗАДАЧА В ДИСКРЕТНОМ ВРЕМЕНИ

В дискретном варианте временная шкала от текущего момента (в который производится непосредственно планирование) до некоторой точки в будущем (называемой «горизонтом планирования» T) разбивается на H временных отрезков равной длины [7]:

$$T = \{ 1, \dots, H \}$$

Длина временного дискрета является минимальным сроком, на который может быть загружен ресурс. В качестве переменных задачи выступают следующие величины:

– $x_{fjt} \in Z$ – накопленный объем работ операции j заказа f к окончанию временного отрезка t (здесь $j=1, \dots, J$, $f=1, \dots, F$, $t=1, \dots, H$);

– $z_{fjt} \in \{0,1\}$ – признак завершенности операции j заказа f к окончанию временного отрезка t ;

– $y_{jt} \in Z$ – количество промежуточной продукции операции j от всех заказов $f=1, \dots, F$, произведенной к окончанию временного отрезка t .

Ограничения задачи представлены матричными неравенствами [7]:

– накопленный объем работ по каждой операции со временем не может уменьшаться:

$$(5) \quad x_{fjt} \geq x_{f,j,(t-1)};$$

– операция j заказа f считается выполненной только при полном выполнении его объема:

$$(6) \quad v_j \cdot z_{fjt} \leq x_{fjt}.$$

Здесь v_j соответствует требуемому объему промежуточной продукции, который производится в результате выполнения операции j (определяется требованиями технологического процесса);

– Выполнение операции j каждого заказа f начинается только после выполнения всех предыдущих операций этого заказа из графа предшествования (технологического маршрута):

$$(7) \quad x_{fjt} \cdot g_{ij} \leq v_i \cdot z_{fjt}.$$

Ограничения (7) формируются для всех операций графа предшествования $j=1, \dots, J$, $i=1, \dots, J$;

– ограничение соблюдения директивных сроков всех заказов $f=1, \dots, F$:

$$(8) \quad z_{fJt} = 1;$$

– в каждый момент времени прибавка промежуточной продукции каждой операции графа предшествования должна соответствовать суммарной разнице накопленного объема данной операции по всем заказам:

$$(9) \quad \sum_{f=1}^F (x_{jt} - x_{f,j,(t-1)}) \leq y_{jt};$$

– загрузка каждого ресурса в каждый момент времени не должна превышать максимально допустимую загрузку:

$$(10) \quad \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J op_{jr} \cdot y_{jt} \leq c_{rt}.$$

3. Расширение моделей цехового планирования на многоресурсный случай

На практике цеховое планирование в большинстве случаев осуществляется применительно к ресурсам разного типа [4, 8, 9]. Например, операции технологического маршрута должны быть распределены между станками, а для выполнения каждой операции требуется рабочий определенной квалификации. В этом случае при формализации задачи планирования исходное единственное множество ресурсов одного типа $R = \{R_r\}$, $r = 1, \dots, R$ заменяется на совокупность нескольких множеств ресурсов различных типов:

$$R = \bigcup_{m=1}^M R_m,$$

где M – количество типов ресурсов цеха.

В данной постановке задачи для каждого типа ресурсов имеем отдельную матрицу использования ресурсов $Op_m = \langle op_{ir} \rangle_m$, $i = 1, \dots, J$, $r = 1, \dots, R_m$, $m = 1, \dots, M$. Формально наличие отдельных матриц использования ресурсов означает кратное дублирование исходной оптимизационной задачи (ЛП или ЦЛП) с различными ограничениями. Таким образом, процесс многоресурсного планирования сводится к совместному решению M задач ЛП или ЦЛП. Однако обратим внимание, что переменные задачи привязаны к операциям

технологического маршрута, а использование ресурсов формализуется совокупностями ограничений (3) и (10). Таким образом, полученные M оптимизационных задач можно свести к одной задаче ЛП или ЦЛП, включающей в себя все ограничения по всем $m=1, \dots, M$ типам ресурсов. Рассмотрим, как при этом модифицируются ограничения задач планирования в непрерывной и дискретной постановках.

3.1. МОДИФИКАЦИЯ ЗАДАЧИ В НЕПРЕРЫВНОМ ВРЕМЕНИ

Задача (1)–(4) сформулирована относительно переменных, представляющих собой моменты начала всех операций всех заказов. Использование ресурсов формализовано группой ограничений (3). Таким образом, при переходе к много-ресурсному варианту количество переменных задачи останется неизменным, а изменения формализации коснутся только группы ограничений (3). Количество неравенств (3) увеличивается пропорционально количеству типов располагаемых ресурсов цеха M . Расширенная группа ограничивающих неравенств имеет вид

$$(11) \quad Op_m \cdot G \cdot \vec{x}_1 \geq Op_m \cdot (\vec{x}_F + \vec{\tau}), \quad m=1, \dots, M.$$

3.2. МОДИФИКАЦИЯ ЗАДАЧИ В ДИСКРЕТНОМ ВРЕМЕНИ

Разбивка временного горизонта задачи планирования на дискреты времени определяет переменные задачи $x_{jft} \in Z$, $z_{jft} \in \{0,1\}$, $y_{jt} \in Z$. Использование ресурсов формализовано группой ограничений (10), количество которых при переходе к много-ресурсному варианту увеличивается пропорционально количеству типов располагаемых ресурсов цеха M (аналогично задаче в непрерывном времени). Расширенная группа ограничивающих неравенств имеет вид

$$(12) \quad \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^J [op_{jr}]_m \cdot y_{jt} \leq c_m, \quad m=1, \dots, M.$$

4. Оценка влияния многоресурсности на скорость решения задачи планирования

Как показано выше, расширение постановок задачи планирования на многоресурсный вариант не увеличивает размерность оптимизационных задач (линейного программирования для непрерывного времени и целочисленного линейного программирования для дискретного времени). При этом количество ограничений возрастает пропорционально количеству типов ресурсов M . Следовательно, не ожидается радикального увеличения машинного времени, затрачиваемого на генерацию расписания (в части решения оптимизационной задачи). Проведем сеансы сравнительного моделирования и оценим время решения задачи планирования для одного (рабочие) и двух (рабочие и станки) типов ресурсов.

4.1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Вычислительные эксперименты проводились с применением ПК на базе процессора Intel Core i7 8 ядер, 32 Гб ОЗУ; выполнение программного кода осуществлялось на виртуальной машине VMWare Workstation 11 с ОС Windows Server 2008 R2, которой было выделено 4 процессорных ядра и 8 Гб ОЗУ.

4.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исходные данные для моделирования процессов планирования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

ЗАДАЧА С ОДНИМ ТИПОМ РЕСУРСА	
Параметр	Значение
Название и кол-во ресурса	73 рабочих 11 различных специальностей
Кол-во операций тех. маршрута	448
Кол-во заказов на конечное изделие	8 заказов по одному изделию каждый
Критерий составления расписания	«makespan» (максимально быстрое выполнение всех заказов)

Окончание табл. 1

ЗАДАЧА С ДВУМЯ ТИПАМИ РЕСУРСОВ	
Параметр	Значение
Название и кол-во ресурса 1	73 рабочих 11 различных специальностей
Название и кол-во ресурса 2	35 станков 20 различных типов
Кол-во операций тех. маршрута	448
Кол-во заказов на конечное изделие	8 заказов по одному изделию каждый
Критерий составления расписания	«makespan» (максимально быстрое выполнение всех заказов)

Результаты моделирования рассмотренной задачи планирования на примере модели ЛП с одним и двумя типами ресурсов представлены в табл. 2–3 и на рисунке.

Таблица 2. Результаты планирования с одним типом ресурса

Кол-во заказов	Размерность задачи ЛП	Кол-во ограниченный	Время счета, с		
			на форм. ограничений	на решение задачи ЛП	всего
1	448	556	3,1	0,5	3,6
2	896	1456	4,5	0,9	5,4
4	1792	3256	22,4	1,7	24,1
8	3584	6856	160	3,5	163,5

Таблица 3. Результаты планирования с двумя типами ресурса

Кол-во заказов	Размерность задачи ЛП	Кол-во ограниченный	Время счета, с		
			на форм. ограничений	на решение задачи ЛП	всего
1	448	4400	22	22	44
2	896	5300	54	40	94
4	1792	7100	81	73	154
8	3584	10700	288	113	401

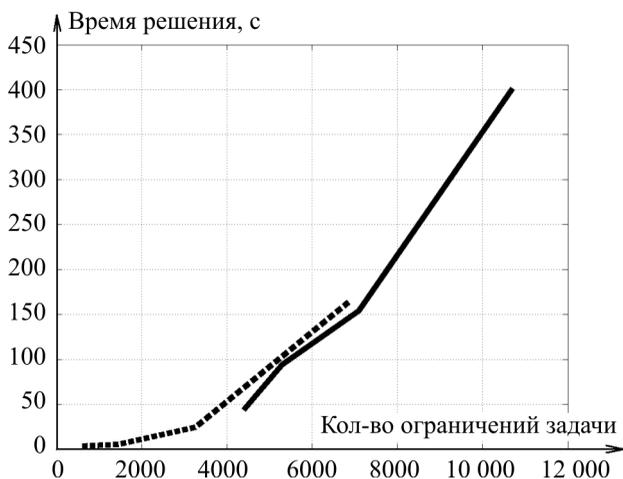


Рис. Время решения задачи для одноресурсной (пунктирная линия) и многоресурсной (сплошная линия) задачи

Результаты тестовых прогонов задачи планирования показали увеличение вычислительных затрат на решение многоресурсного варианта. Увеличение времени обсчета многоресурсного варианта обусловлено дополнительными ограничениями, накладываемыми на переменные задачи. Однако, как видно на рисунке, усложнение самого алгоритма решения не происходит (в районе соприкосновения пунктирной и сплошной линий видно, что время счета для одного и того же количества ограничений обоих вариантов задачи совпадает).

5. Заключение

В работе проведен анализ многоресурсной задачи цехового планирования, являющейся одним из наиболее распространенных практических приложений проблемы RCPSP. Проведена адаптация одноресурсных моделей линейного (ЛП) и целочисленного линейного (ЦЛП) программирования. Показано, что при этом для обеих задач не происходит увеличения количества переменных, а модификация моделей планирования заключается в расширении ограничивающих неравенств, кратном количе-

ству типов доступных ресурсов. Экспериментальное моделирование показало, что с вычислительной точки зрения усложнение процесса решения оптимизационной задачи в данном случае является обоснованным и проявляется как в увеличении времени подготовки к непосредственному решению задачи (время формирования ограничений в табл. 1–2), так и в увеличении времени решения самой оптимизационной задачи.

Литература

1. ЕВГЕНЕВ Г.Б., ГАВРЮШИН С.С., ХОБОТОВ Е.Н. *Методы тактического планирования деятельности предприятий // Основы автоматизации технологических процессов и производств.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 479 с.
2. ЛАЗАРЕВ А.А., НЕКРАСОВ И.В., ПРАВДИВЕЦ Н.А. *Оптимальное планирование загрузки ресурсов предприятия: базовая постановка задачи в непрерывном времени и ее расширения // Теория расписаний и методы декомпозиции.* Танаевские чтения: тр. 7-й Междунар. науч. конф.; Беларусь, Минск, 2016; ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2016. – С. 108–113.
3. О'ЛИРИ Д. *ERP-системы: Современное планирование и управление ресурсами предприятия. Выбор, внедрение, эксплуатация* / пер. с англ. Ю.И. Водяновой; ООО «Вершина». – М., 2004. – 272 с.
4. ПРИЛУЦКИЙ М.Х., КУМАГИНА Е.А. *Оптимальные стратегии распределения ресурсов в сетевых структурах // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.* Сер. Математическое моделирование. Оптимальное управление. – 2014. – № 1(1). – 272 с.
5. *Технико-экономическое планирование с применением электронно-вычислительных машин* / О. КОЗЛОВА, Г. БРОДСКИЙ, В. ДУДОРИН, С. МИТИН, Л. НИКОНОВА, Н. САЛОМАТИН // *Применение электронно-вычислительных машин в управлении производством.* – М.: Мысль, 1965. – 509 с.
6. ARTIGUES C., DEMASSYE S, NERON E. *Resource-constrained project scheduling: models, algorithms, extensions and applications.* – ISTE Ltd, 2008. – 308 p.

7. JOZEFOWSKA J., WEGLARZ J. Perspectives in modern project scheduling. – Springer Science+Business Media, LLC, 2006. – 453 p.
8. McCLELLAN M. Applying manufacturing execution systems. – Boca Raton, Florida, The St.Lucie Press, LLC, 1997. – 208 p.
9. RILEY E. Manufacturing execution system (MES). An examination of implementation strategy // A thesis presented to the faculty of California Polytechnic State University. – San Luis Obispo, 2013. – 55 p.

MULTI-TYPE RESOURCE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM: COMPARING REALIZATION TECHNIQUES AND APPROACHES

Alexander Lazarev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (jobmath@mail.ru).

Ivan Nekrasov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc. (ivannekr@mail.ru).

Abstract: This paper considers two basic approaches to formalize RCPSP problem: a discrete and continuous time problem settings. Both settings were initially formulated for a single-type resource case (for instance – a machine tool). We show how the single-type resource setting can be adopted to fit the multi-type resource case (for instance when we want to simultaneously schedule operations for machine tools, personnel, rigging, raw material, etc.). This research suggests a comparative analysis of both scheduling models for an enlarged multi-type resource case. The comparison is conducted by such criteria as model adoption minimalism and the computational complexity increase ratio.

Keywords: RCPSP, job shop, MES, multi-type resource scheduling, integer linear programming, computational complexity.

УДК 621.391:004.052
ББК 32.96

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МЯГКОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ В ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Фрейман В.И.¹

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Дубовцева Д.А.²

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

В данной статье рассмотрено построение модели итеративного декодирования в программе Microsoft Office Excel 2007 с поддержкой макросов и последующее применение модели для исследования алгоритмов мягкого декодирования в приемных устройствах элементов распределенных систем управления. На основе данных исследований выявлены зависимости и сделаны выводы.

Ключевые слова: турбокод, итеративное декодирование, составление модели.

1. Введение

В настоящее время происходит интенсивное развитие цифровых систем передачи данных – спутниковой, мобильной связи и др. Для таких систем характерно использование беспроводных каналов для передачи данных. В беспроводных каналах на передаваемый сигнал действуют различные помехи, а это значит, что принятые данные с достаточно большой вероятностью бу-

¹ Владимир Исаакович Фрейман, кандидат технических наук, профессор (vfrey@mail.ru).

² Дарья Александровна Дубовцева, студентка (dasha.dubovtseva@mail.ru).

дут содержать ошибки. В результате возникает проблема обеспечения надежной передачи цифровой информации по каналам с шумами.

Чтобы обеспечить высокую достоверность передачи данных, используется помехоустойчивое кодирование. Для передачи данных по беспроводным каналам используются турбокоды, образующиеся путем каскадирования двух или более составляющих кодов. Турбокоды позволяют повысить надежность передачи при низких значениях E_b/N_0 . В связи с вышеописанным исследование алгоритмов мягкого декодирования на сегодняшний день является актуальным.

Впервые турбокоды были предложены К. Берроу, А. Главье и П. Ситимашимой в 1993 г. в статье «Кодирование и декодирование с исправлением ошибок вблизи предела Шеннона: Турбокоды» (англ. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo Codes), опубликованной IEEE. До появления турбокодов широко использовался метод каскадного кодирования: сначала данные кодировались кодом Рида-Соломона, а затем сверточным кодом [1].

Задачей данной статьи является исследование алгоритмов мягкого декодирования, что можно реализовать при помощи построения модели итеративного декодирования в программе Microsoft Office Excel 2007 с поддержкой макросов.

2. Теоретические основы

2.1. СТРУКТУРА КОМПОЗИЦИОННОГО КОДА

Рассмотрим двухмерный код (композиционный код), изображенный на рис. 1. Структуру данного кода можно описать как массив данных, состоящий из k_1 строк и k_2 столбцов. В k_1 строках содержатся кодовые слова, образованные k_2 битами данных и $n_2 - k_2$ битами четности. Каждая из k_1 строк представляет собой кодовое слово кода (n_2, k_2) . Аналогично k_2 столбцов содержат кодовые слова, образованные из k_1 бит данных и $n_1 - k_1$ бит четности. Таким образом, каждый из k_2 столбцов представляет собой кодовые слова кода (n_1, k_1) . Различные участки структуры обозначены следующим образом: d – для данных,

p_h – для горизонтальной четности (вдоль строк) и p_v – для вертикальной четности (вдоль столбцов). Фактически каждый блок битов данных размеров $k_1 \times k_2$ кодирован двумя кодами – горизонтальным и вертикальным.

Еще на рис. 1 присутствуют блоки L_{eh} и L_{ev} . В них содержатся значения внешних LLR, полученные из горизонтального и вертикального кодов [2].

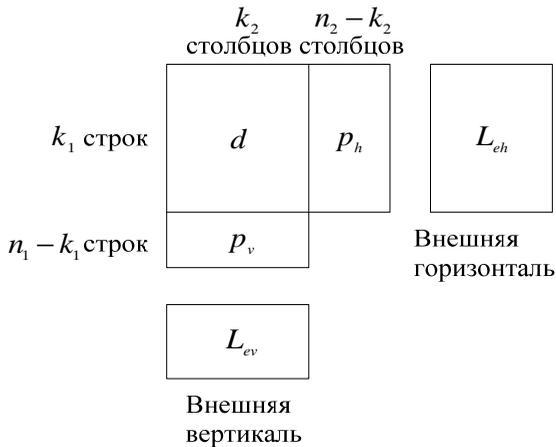


Рис. 1. Структура двумерного композиционного кода

2.2. АЛГОРИТМ ИТЕРАТИВНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ

Для удобства вычислений используется логарифмическое отношение правдоподобия (log-likelihood ratio – LLR). Выходное LLR декодера имеет следующий вид:

$$(1) \quad L(\hat{d}) = L_c(x) + L(d) + L_e(\hat{d}).$$

Для композиционного кода алгоритм итеративного декодирования следующий:

1. Устанавливается априорное LLR $L(d) = 0$. То есть на первом шаге данные считаются равновероятными.

2. Декодируется горизонтальный код и вычисляется горизонтальное LLR (из уравнения (1)) $L_{eh}(\hat{d}) = L(\hat{d}) - L_c(x) - L(d)$,

где $L(\hat{d})$ – мягкое решение вне декодера; $L_c(x)$ означает, что данный член LLR получается в результате канальных измерений, произведенных в приемнике; $L(d)$ – априорное LLR бита данных d .

3. На этапе 4 вертикального декодирования устанавливается $L(d) = L_{eh}(\hat{d})$.

4. Декодируется вертикальный код и вычисляется вертикальное LLR (из уравнения (1)): $L_{ev}(\hat{d}) = L(\hat{d}) - L_c(x) - L(d)$.

5. Для этапа 2 горизонтального декодирования устанавливается $L(d) = L_{ev}(\hat{d})$. Затем повторяются этапы 2–5.

6. После достаточного для получения надежного решения количества итераций (т.е. повторения этапов 2–5) следует перейти к этапу 7.

7. Мягким решением на выходе будет

$$(2) \quad L(\hat{d}) = L_c(x) + L_{eh}(\hat{d}) + L_{ev}(\hat{d}).$$

Решение при финальном декодировании каждого бита и его надежности зависит от значения $L(\hat{d})$ [2].

Схематично данный алгоритм можно описать следующим образом (рис. 2).

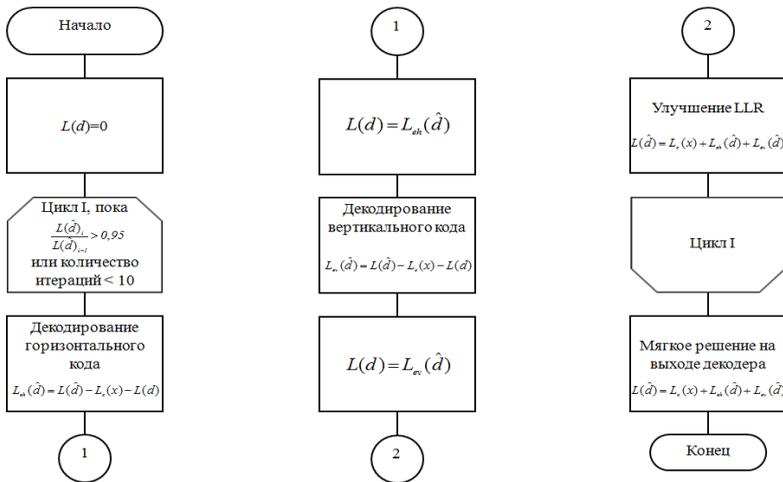


Рис. 2. Алгоритм итеративного декодирования

3. Разработка модели

Для построения модели итерационного декодирования будет использоваться программа Microsoft Office Excel 2007 с поддержкой макросов. Наличие различных опций для выполнения вычислений, интуитивно понятный интерфейс и возможность расширить базовые возможности программы с помощью макросов облегчают и ускоряют выполнение вычислений. Применение этих программных средств делает реализацию модели итеративного декодирования наглядной и удобной.

Пусть выходные двоичные цифры кодера имеют значения, показанные на рис. 3. Для облегчения зрительного восприятия присвоим данным d_{ij} и битам четности p_{hi}, p_{vj} разные цвета.

1		Выходные двоичные цифры кодера					
2	d_{ij}	1	0	1	0		
3	p_{hi}, p_{vj}	1	0	1	0		
4		1	1	0	0		
5		1	1	0			
6							
7		Выходные данные кодера, эл. напряжение					
8		1	-1	1	-1		
9		1	-1	1	-1		
10		1	1	-1	-1		
11		1	1	-1			
12							
13		Принятые данные					
14		0,70	0,10	0,30	-0,05		
15		1,10	-0,50	0,50	-0,70		
16		1,40	2,00	0,05	-0,15		
17		1,00	0,65	-1,10			

Рис. 3. Выходные двоичные цифры кодера, выходные данные кодера и принятые данные

Для вычисления p_{hi}, p_{vj} необходимо сложение по модулю 2 всех трех элементов строки и столбца соответственно. Для этого необходимо создать макрос MyXORfor3 на языке макропрограммирования VBA.

Если считать, что логическая 1 соответствует электрическому напряжению +1, а логический 0 соответствует напряжению -1, выходные данные кодера показаны на рис. 3. Чтобы автоматизировать данный переход, воспользуемся функцией

ЕСЛИ(C2=1;1;-1). То есть если C2=1, то возвращает 1, если C2 ≠ 1, то возвращает -1.

Также присвоим значения принятым данным (см. рис. 3), считая, что на сигнал воздействовали помехи.

В данном случае видно, что при жестком принятии решений биты d_{12} и d_{33} можно ошибочно принять за 1, хотя передавалось значение -1. Далее вычисляется логарифмическое отношение функций правдоподобия на входе декодера, $L_c(x)$ как показано в [2]. Значение принятых данных, записанных в ячейках таблицы «Принятые данные» (см. рис. 3) умножается на 2.

Далее все значения, которые берутся из таблицы «Логарифмического отношения функций правдоподобия на входе декодера» указываются с помощью абсолютных ссылок (например, \$A\$1).

Согласно алгоритму итеративного декодирования композиционного кода принимаются априорные значения $L(d) = 0$ для первого горизонтального декодирования.

Мягкий выход $L(\hat{d}_{ij})$ для принятого сигнала d_{ij} в случае, показанном на рис. 2, в общем виде для строки

$$(3 \text{ а}) \quad L(\hat{d}_{ij}) = L_c(x_{ij}) + L(d_{ij}) + \left\{ \left[L_c(x_{i1}) + L(d_{i1}) \right] [\oplus] \right. \\ \left. [\oplus] \left[L_c(x_{i2}) + L(d_{i2}) \right] [\oplus] L_c(x_{hi}) \right\}$$

$$\text{при } \begin{cases} l_1, l_2 = \overline{1, n}, \\ l_1 \neq l_2, \\ l_1, l_2 \neq j, \end{cases}$$

где индексы $i1, i2$ обозначают соседние в строке для d_{ij} биты данных; $L_c(x_{ij}), L_c(x_{i1}), L_c(x_{i2})$ и $L_c(x_{hi})$ – канальное измерение LLR приема соответствующих d_{ij}, d_{i1}, d_{i2} и p_{hj} ; $L(d_{ij}), L(d_{i1}), L(d_{i2})$ – LLR для априорных вероятностей d_{ij}, d_{i1}, d_{i2} ; выражение, заключенное в фигурные скобки $\{ \}$ – внешнее распределение LLR для кода.

Мягкий выход $L(\hat{d}_{ij})$ для столбца

$$(3 \text{ б}) \quad L(\hat{d}_{ij}) = L_c(x_{ij}) + L(d_{ij}) + \left\{ \left[L_c(x_{l_j}) + L(d_{l_j}) \right] [\oplus] \right. \\ \left. [\oplus] \left[L_c(x_{l_2j}) + L(d_{l_2j}) \right] [\oplus] L_c(x_{vj}) \right\}$$

$$\text{при } \begin{cases} l_1, l_2 = \overline{1, m}, \\ l_1 \neq l_2, \\ l_1, l_2 \neq i, \end{cases}$$

где индексы l_1j, l_2j обозначают соседние в столбце для d_{ij} биты данных; $L_c(x_{ij}), L_c(x_{l_1j}), L_c(x_{l_2j})$ и $L_c(x_{vj})$ – канальное измерение LLR приема соответствующих $d_{ij}, d_{l_1j}, d_{l_2j}$ и p_{vj} ; $L(d_{ij}), L(d_{l_1j}), L(d_{l_2j})$ – LLR для априорных вероятностей $d_{ij}, d_{l_1j}, d_{l_2j}$; выражение, заключенное в фигурные скобки $\{\}$ – внешнее распределение LLR для кода.

Сложения логарифма правдоподобия $[\oplus]$ производятся исходя из приближения, показанного в уравнении

$$(4) \quad L(d_1) [\oplus] L(d_2) = (-1) \times \text{sgn}[L(d_1)] \times \text{sgn}[L(d_2)] \times \min(|L(d_1)|, |L(d_2)|).$$

Декодирование горизонтального кода производится согласно внешним распределениям LLR для кода из уравнения (3а, 3б). В данном случае для упрощения вычислений можно создать макрос `MySumm`, который будет выполнять сложение по модулю 2 двух логарифмических отношений правдоподобия. Макрос `MySumm` будет использоваться согласно внешним распределениям LLR для кода из уравнения (3а, 3б) для строки и столбца.

Далее считается улучшение LLR после первого горизонтального и вертикального декодирования согласно уравнению (2) как сумма $L_c(x), L_{eh}(d^{\wedge}), L_{ev}(d^{\wedge})$ (рис. 4). Значения априорных вероятностей для удобства были вынесены в отдельные ячейки (на рисунке не показано).

Вычисление второй итерации производится аналогично, достаточно скопировать значения ячеек рабочего листа, где выполнялась первая итерация, и вставить строкой ниже. Так как для вычисления $L_{eh}(d^{\wedge})$ уже используются априорные значения, полученные исходя из первого вертикального декодирования, то необходимо присвоить соответствующие значения для априорной вероятности. Все значения ячеек изменятся автоматически.

Вычисление третьей и последующих итераций производится аналогично, достаточно скопировать значения ячеек рабочего листа, где выполнялась вторая итерация и вставить строкой ниже. Все значения ячеек изменятся автоматически.

	А	В	С	Д	Е	Г	Н	І
25	1я итерация Вычисление внешних функций правдоподобия							
26			1,40	0,20	0,60	-0,10	-0,10	-0,10
27			2,20	-1,00	1,00	1,00	-1,00	1,00
28			2,80	4,00	0,10	-0,10	-0,10	-0,30
29						$L_{eh}(d)$		
30			2,00	-1,30	0,20			
31			1,30	0,10	0,20			
32			1,30	-0,10	-0,50			
33			$L_{ev}(d)$					
34								
35	Улучшение LLR после первого горизонтального и вертикального декодирования							
36			$i26+C30$	-1,20	0,70			
37			4,50	-1,90	2,20			
38			4,00	3,80	-0,70			

Рис. 4. Улучшение LLR после первой итерации декодирования

Итак, из результатов декодирования видно, что значения битов d_{12} и d_{33} были исправлены (полученных значений достаточно для получения правильного жесткого решения вне декодера) уже после первой итерации. После проведения второй итерации виден прирост степени доверия к биту d_{33} . После третьей итерации степень доверия к битам не изменилась.

В полученной модели существует возможность изменения входных параметров, что позволяет проводить исследования для различных принятых данных.

4. Экспериментальная часть

Влияние симметричных ошибок в строке и столбце для информационных бит показано на рис. 5, 6.

Также в процессе исследования было рассмотрено влияние следующих помех на результаты декодирования:

- ◆ симметричных (в строке, столбце, по диагонали), действующих на информационные биты;
- ◆ единичных;
- ◆ асимметричных (в строке, столбце, по диагонали), действующих на информационные биты;
- ◆ симметричных в проверочных битах;
- ◆ асимметричных в проверочных битах;
- ◆ асимметричных в информационном и проверочном бите.

Также исследовано влияние степени искажения бита на результаты декодирования.

Принятые данные			
0,70	0,10	-0,03	-0,03
1,10	-0,50	0,50	-0,70
1,40	2,00	-0,05	-0,15
1,00	0,65	-1,10	
Логарифмическое отношение функций правдоподобия на входе декодера, $L(x)$			
1,40	0,20	-0,06	-0,10
2,20	-1,00	1,00	-1,40
2,80	4,00	-0,10	-0,30
2,00	1,30	-2,20	
1я итерация Вычисление внешних функций правдоподобия			
1,40	0,20	-0,06	0,06 0,06 -0,10
2,20	-1,00	1,00	1,00 -1,00 1,00
2,80	4,00	-0,10	0,10 0,10 -0,30
$L_{ex}(d)$			
2,00	-1,30	0,40	
1,46	0,26	-0,16	
1,46	-0,26	0,16	
$L_{ex}(d)$			
Улучшение LLR после первого горизонтального и вертикального декодирования			
3,46	-1,04	0,24	
4,66	-1,74	1,84	
4,36	3,84	-0,24	

Рис. 5. Результаты декодирования при симметричных ошибках в строке (информационные биты d_{12} и d_{13})

Принятые данные			
0,70	0,10	0,30	-0,05
1,10	-1,50	0,50	-0,70
1,40	-0,05	-0,05	-0,15
1,00	0,65	-1,10	
Логарифмическое отношение функций правдоподобия на входе декодера, $L(x)$			
1,40	0,20	0,60	-0,10
2,20	-3,00	1,00	-1,40
2,80	-0,10	-0,10	-0,30
2,00	1,30	-2,20	
2я итерация Вычисление внешних функций правдоподобия			
1,40	0,20	0,60	-0,10 -0,10 -0,10
2,20	-3,00	1,00	1,00 -1,00 1,40
2,80	-0,10	-0,10	-0,20 0,30 0,20
$L_{ex}(d)$			
2,00	-0,20	-0,10	
1,30	0,10	-0,10	
1,30	-0,10	-0,50	
$L_{ex}(d)$			
Улучшение ЛОФП после второго горизонтального и вертикального декодирования			
3,30	-0,10	0,40	
4,50	-3,90	2,30	
3,90	0,10	-0,40	

Рис. 6. Результаты декодирования при симметричных ошибках в столбце (информационные биты d_{12} и d_{32})

5. Заключение

На основании проведенных исследований были получены следующие результаты.

Данная модель итеративного декодирования исправляет единичные ошибки, двойные симметричные и асимметричные ошибки, действующие на информационные и проверочные биты. При этом гарантированно исправляются ошибки, имеющие значения более низкого порядка (сотые доли), чем другие переданные биты. Это соответствует тому, что турбокоды были разработаны для передачи данных по беспроводным каналам с шумами, т.е. при низких значениях отношения E_b/N_o .

Также следует отметить, что данная модель наиболее чувствительна к исправлению симметричных ошибок, нежели асимметричных. Значения симметричных ошибок, исправляемых декодером, может быть такого же порядка либо меньше, чем значения других переданных битов. Значения асимметричных ошибок, исправляемых декодером, могут быть только меньшего порядка, чем значения других переданных битов. Это объясняется тем, что данная модель была разработана для канала AWGN, в которых на сигнал действуют в основном симметричные ошибки.

Для разработки модели была выбрана программа Microsoft Office Excel 2007 с поддержкой макросов как удобный инструмент для реализации поставленных задач.

Литература

1. *Википедия. Турбокод* [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Турбо-код>.
2. СКЛЯР Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*; пер. с англ. – 2-е изд., испр. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.

INVESTIGATION OF SOFT DECODING ALGORITHMS IN RECEIVING DEVICES OF ELEMENTS OF DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS

Vladimir Freyman, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of AT (vfrey@mail.ru).

Darya Dubovceva, Perm National Research Polytechnic University, Perm, student (dasha.dubovtseva@mail.ru).

Abstract: This article discusses how to build an iterative decoding model in Microsoft Office Excel 2007 with support for macros. The presence of various options for performing calculations, an intuitive interface and the ability to expand the basic capabilities of the program with the help of macros facilitate and accelerate the execution of calculations. The application of these software will make the implementation of the iterative decoding model visual and convenient. In the obtained model, the effect of various interference on the decoding results was investigated. Conclusions are made that this model of iterative decoding corrects single errors, double symmetric and asymmetric errors, acting on information bits and verification bits. At the same time, errors that have values of lower order (hundredths of a fraction) are guaranteed to be corrected than other transmitted bits. It should also be noted that this model is the most sensitive to correcting symmetrical errors, rather than asymmetric ones.

Keywords: turbo code, iterative decoding, model compilation.

УДК 682.5
ББК 32.96

НЕЧЕТКАЯ ЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ ДВУХЗВЕННОГО ГУСЕНИЧНОГО ТРАНСПОРТЕРА «ВИТЯЗЬ»

Хуснутдинов Д.З.¹

*(Уфимский государственный технический
университет, Уфа)*

Предложен метод интеллектуальной компенсации возмущений при движении двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» на основе нечеткой логики. Метод проверен на имитационной математической модели движения транспортера. Приведены результаты численного расчета модели совместно с нечетким алгоритмом управления.

Ключевые слова: транспортер «Витязь», нечеткая логика, компенсация возмущений.

1. Введение

Двухзвенные гусеничные транспортеры (ДГТ) ОАО «МК «Витязь»» (рис. 1) предназначены для работы в особо тяжелых дорожно-климатических условиях Крайнего Севера, Заполярья и Антарктиды. Они используются для перевозки грузов по заснеженной, болотистой, сильнопересеченной местности в экстремальных климатических условиях.

Основой управления движением ДГТ является принцип двухзвенности. Поворот гусеничного вездехода осуществляется за счет угла складывания между передним и задним звеньями с помощью силовых гидроцилиндров. Скорость движения гусениц при этом постоянна.

¹ Дим Зинфирович Хуснутдинов, аспирант (dz_khusnutdinov@mail.ru).



Рис. 1. Внешний вид и схема транспортера «Витязь»

Одним из направлений совершенствования ДГТ является разработка беспилотных машин. С данным направлением тесно связаны задачи исследования динамики и синтеза системы автоматического управления движением транспортера. При этом на движение реального объекта постоянно влияют возмущения. Возмущения могут возникнуть при обрывах гусениц, пробуксовках, со стороны течения при преодолении водных преград и т.п. Эксперименты показывают, что необходимо создание компенсационной системы для инвариантности системы управления к возмущениям [1].

2. Модель движения двухзвенного транспортера

Для проведения исследований движения двухзвенных гусеничных транспортеров необходима математическая модель, которая могла бы быть использована для синтеза системы автоматического управления движением и при этом отличалась бы простотой и точностью.

ДГТ представляет собой сочлененное тело, и математическое описание его движения связано с рядом проблем. В доступной литературе работы по описанию динамики движения транспортера отсутствуют. При этом в науке модель для сочлененных тел, в основном для роботов манипуляторов, принято

получать посредством составления уравнения Лагранжа второго рода [3, 6]. Выражения модели при этом получаются громоздкими и неудобны при расчетах совместно с алгоритмами системы управления.

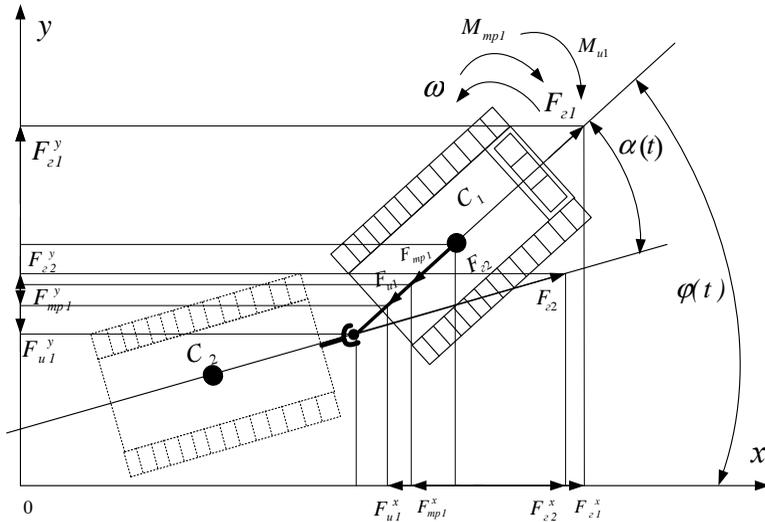


Рис. 2. Расстановка сил, действующих на ДГТ при движении

В работе предлагается простой метод исследования движения ДГТ, который возможен благодаря некоторым положениям. Все четыре гусеницы ДГТ ведущие, поэтому при движении прямо воздействие звеньев друг на друга несущественно, что позволяет пренебречь этими воздействиями составлении модели. Другими словами, при составлении модели силы реакции связей между звеньями можно не учитывать. Во время поворота, при угле складывания звеньев больше нуля, сила со стороны второго звена на первую возрастает. Если рассматривать первое звено, данная сила действует на шарнир и направлена вдоль оси второго звена [2].

Эта сила стремится увести заднюю часть первого звена, тем самым совершая поворот, при котором изменяется угол положения транспортера относительно осей координат, и соответственно, направление движения транспортера. При этом для наблюдения объекта движения достаточно знать координаты первого звена (рис. 2).

Таким образом, модель движения будет представлять собой систему уравнений для свободного плоского движения тела на плоскости. Математическая модель состоит из трех уравнений. Это уравнение вращения тела, которое может быть получено как сумма моментов, действующих на тело, а также два уравнения в виде суммы проекции сил на оси:

$$(1) \quad m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \cos(\varphi(t)) + k_{mp} \frac{dx(t)}{dt} \cos(\varphi(t)) = \\ = F_{z1}^x \cos(\varphi(t)) + F_{z2}^x \cos(\varphi(t) - \alpha(t)),$$

$$(2) \quad m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \sin(\varphi(t)) + k_{mp} \frac{dy(t)}{dt} \sin(\varphi(t)) = \\ = F_{z1}^y \sin(\varphi(t)) + F_{z2}^y \sin(\varphi(t) - \alpha(t)),$$

$$(3) \quad J \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + k_{мпJ} \frac{d\varphi(t)}{dt} = F_{z2} L \sin(\alpha(t)),$$

где F_{z1} – сила тяги гусениц первого звена; F_{z2} – сила тяги гусениц второго звена, $\varphi(t)$ – угол поворота транспортера, $\alpha(t)$ – угол складывания звеньев относительно друг друга; J – момент инерции звена; k_{mp} – коэффициент трения звена при прямолинейном движении; m – масса звена; $k_{мпJ}$ – коэффициент трения первого звена при повороте.

3. Схема системы нечеткого управления

Если обратиться к опыту эксперта-водителя, то коррекцию отклонений он выполняет по одному параметру, по кратчайшему расстоянию между фактическим положением и траекторией движения. Подобным образом коррекцию можно проводить по одной, более удобной, координате положения. Эта та координата, на ось которой вектор скорости проецируется в меньшую величину, чем в случае другой координаты.

Для пояснения способа определения входных параметров в блок принятия решения на рис. 3 и 4 представлены ситуации отклонений транспортера от заданного маршрута. Траектория

движения транспортера задана в виде кривой 3, на которой положение транспортера определяется координатами $(x^3(t), y^3(t))$. По заданной кривой можно определить заданную скорость движения $\Delta V^3(t)$. Отклоняясь, транспортер имеет фактические координаты $(x^\phi(t), y^\phi(t))$ и скорость $\Delta V^\phi(t)$. Являясь векторными величинами, данные скорости проецируются на оси координат: фактическая, как $\Delta V_x^\phi(t)$ и $\Delta V_y^\phi(t)$, заданная, как $\Delta V_x^3(t)$ и $\Delta V_y^3(t)$.

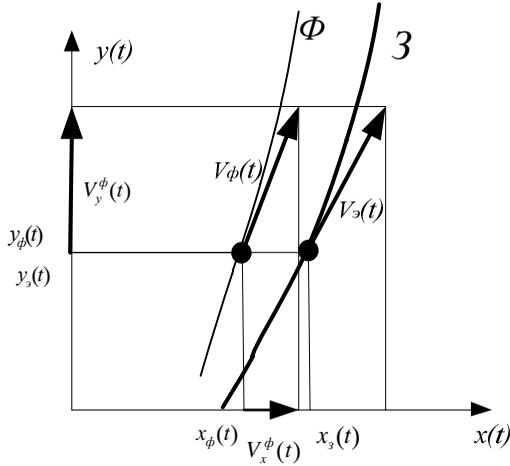


Рис. 3. Ситуация, при которой $\Delta V(t) > 0$

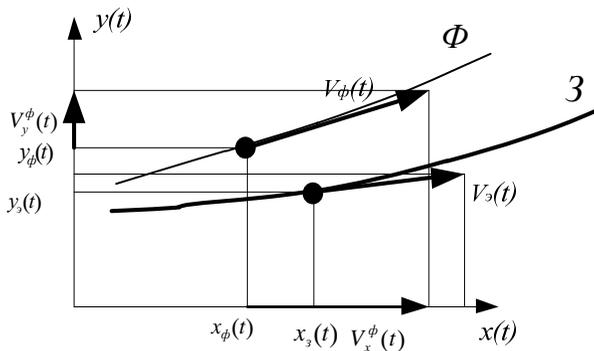


Рис. 4. Ситуация, при которой $\Delta V(t) < 0$

При этом решение, по какому из перечисленных параметров проводить коррекцию, принимается по знаку параметра, определяемому по выражению

$$(4) \quad \Delta V(t) = \Delta V_x(t) - \Delta V_y(t) = (V_x^o(t) - V_x^f(t)) - (V_y^o(t) - V_y^f(t)).$$

Разности скоростей $\Delta V_x(t)$, $\Delta V_y(t)$ определяют отличие проекций заданной скорости и фактической скорости на оси. Разность $\Delta V(t)$ несет в себе информацию о направлении отклонения и ее величине.

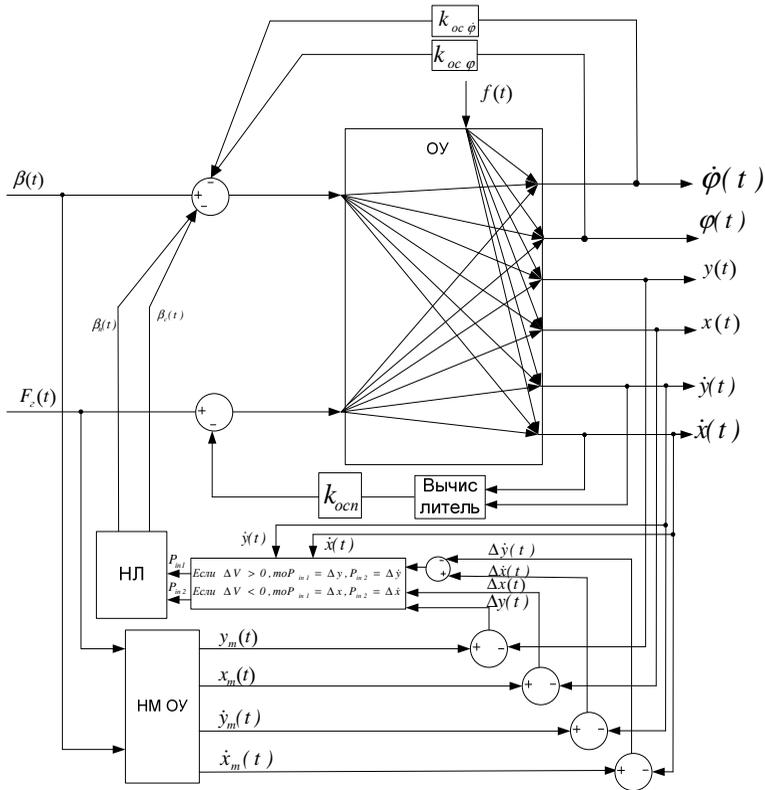


Рис. 5. Система интеллектуального нечеткого управления

Исходная схема системы управления, представляющая собой объект управления с обратными связями, имеет хорошие динамические свойства. Но при возмущениях траектория моде-

ли исходной системы управления отклоняется от заданной. Для разработки системы интеллектуальной логической компенсации возмущений при движении ДГТ предлагается схема, при котором в качестве блока задачи траектории выступает невозмущенная модель движения транспортера (рис. 5).

НМ ОУ – невозмущенная модель объекта управления, НЛ – блок нечеткой логической системы компенсации возмущений; $\Delta x_m(t)$, $\Delta y_m(t)$ – координаты транспортера, выдаваемые эталонной невозмущенной моделью; ОУ – объект управления; $\beta(t)$ – угловое положение рулевого колеса; F_z – сила тяги гусениц; $K_{осп}$ – коэффициент обратной связи поступательного движения (см. рис. 5).

В блок НЛ подается отклонение по одной из координат и его скорости. Координата определяется по знаку вычислимого параметра $\Delta V(t)$. Блок НЛ после логической обработки выдает два параметра коррекции по скорости и отклонению угла рулевого колеса.

4. Анализ эффективности компенсационной системы

На рис. 6–7 представлены результаты численного расчета математической модели движения ДГТ.

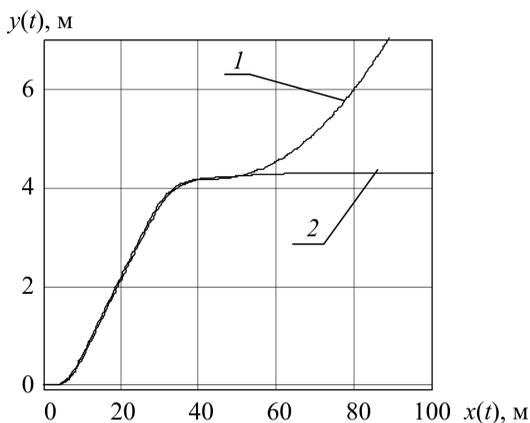


Рис. 6. Траектория движения транспортера при воздействии возмущающих сил

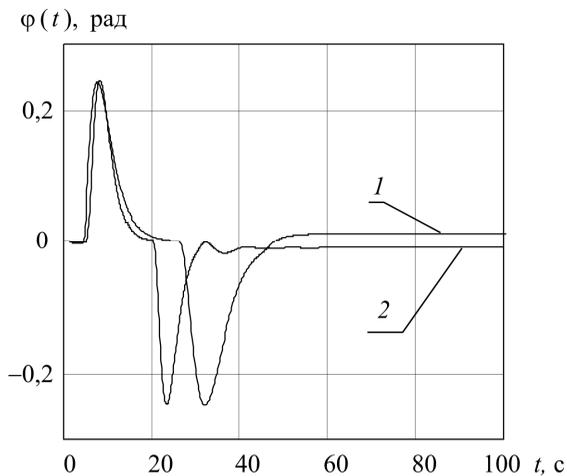


Рис. 7. Угловое положение транспортера при воздействии возмущающих сил

Модель рассчитывается совместно с математической моделью привода гидравлического руля, рассмотренного автором в работах [3, 5] и алгоритмом рассматриваемой системы управления.

При этом возмущения выражены в виде ступенчатой, релейной функции. Возмущения появляются после тридцатой секунды моделирования. Возмущения влияют в виде момента, стремящегося увести транспортер от заданной траектории.

Кривые 1 на рис. 6–7 соответствуют возмущенной системе с выключенным контуром управления, а кривые 2 – возмущенной системе с включенным контуром управления.

При воздействии описанных выше сил возмущения водитель компенсирует данное возмущение путем задания некоторого угла складывания между звеньями, который пропорционален величине возмущения. Так, интеллектуальная система управления выполняет компенсацию возмущения дополнительным углом между кинематическими звеньями транспортера (см. рис. 7). Проведенные численные испытания показывают эффективность интеллектуальной системы компенсации возмущений при движении транспортера.

Литература

1. ИЛЬЯСОВ Б.Г., ХУСНУТДИНОВ Д.З., ЯРУЛЛИН Ч.А. *Синтез интеллектуальной системы управления движением двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» на основе имитационного моделирования* // Международный научный журнал. – 2016. – № 10 (52). – Ч. 2. – С. 46–53.
2. ИЛЬЯСОВ Б.Г., ХУСНУТДИНОВ Д.З., ЯРУЛЛИН Ч.А. *Метод получения имитационных моделей движения двухзвенных гусеничных транспортеров «Витязь»* // Вестн. УГАТУ. – 2016. – Т. 20, № 1 (71). – С. 20–25.
3. *Математическое моделирование мобильного гусеничного робота* / С.Ф. ЯЦУН, ЧЖО ПЬО ВЕЙ, А.В. МАЛЬЧИКОВ, Е.С. ТАРАСОВА // Изв. Юго-Запад. гос. ун-та. – 2011. – № 1 (34). – С. 10–17.
4. *Математическое моделирование рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь»* / А.И. ИЛЬИН, Т.Р. САЙФЕЕВ, В.А. ЦЕЛИЩЕВ, Д.З. ХУСНУТДИНОВ, Ч.А. ЯРУЛЛИН // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17, № 1 (54). – С. 73–78.
5. *Сравнительный анализ нелинейностей математической модели рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь» с гидравлической обратной связью* / А.И. ИЛЬИН, Т.Р. САЙФЕЕВ, А.М. ПУГИН, В.А. ЦЕЛИЩЕВ, Д.З. ХУСНУТДИНОВ, Ч.А. ЯРУЛЛИН // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17, № 4 (56). – С. 167–176; 86–90.
6. ШАРИКОВ Н.В. *Моделирование управляемого движения манипулятора* // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – № 9. – Ч. 1.

FUZZY LOGIC SYSTEM OF COMPENSATION OF PERTURBATIONS AT THE MOTION OF THE TWO TRAVELER TRANSPORTER "VITYAZ"

Khusnutdinov Dim Zinfirovich, Post-graduate student of the Department of Technical Cybernetics of GBOU VO UGATU (Ufa, dz_khusnutdinov@mail.ru).

Abstract: A method of intellectual compensation of disturbances during motion of a two traveler transporter "Vityaz" based on fuzzy logic is proposed. The method is checked on the simulation mathematical model of the conveyor movement. Results of numerical model calculation together with fuzzy control algorithm are presented.

Keywords: transporter "Vityaz", fuzzy logic, compensation of disturbances.

УДК 021.8 + 025.1
ББК 78.34

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОСТЫВАНИЯ СЛИТКА В УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ (УНРС)

Галкин А.В.¹, Тырин Д.Ю.²

*(Липецкий государственный технический
университет, Липецк)*

Пименов В.А.³

(ПАО НЛМК, Липецк)

В данной работе проводится исследование динамики изменения температуры слэба в процессе прохождения им установки непрерывной разливки стали путем моделирования на ЭВМ. Представлены математическая модель остывания слитка в УНРС и реализующее данную модель программное обеспечение с визуализацией температурного поля слэба.

Ключевые слова: установка непрерывной разливки стали, метод конечных элементов, уравнение теплопроводности.

1. Введение

Целью работы является определение оптимальных параметров работы УНРС, позволяющих получить максимальную производительность при минимизации вероятности возникновения дефектов поверхности и внутренней структуры выходного продукта.

¹ Александр Васильевич Галкин, кандидат технических наук, доцент (avgalkin82@mail.ru).

² Дмитрий Юрьевич Тырин, студент (dimedrius@mail.ru).

³ Владимир Александрович Пименов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник (pimenov_va@nlmk.com).

Расчеты основываются на анализе распределения тепла, которое, в свою очередь, описывается уравнениями математической физики, в частности уравнением теплопроводности, являющимся дифференциальным уравнением в частных производных параболического типа. В контексте решения поставленной задачи использовался универсальный абсолютно устойчивый численный метод – метод конечных элементов.

2. Объект исследования

Непрерывная разливка стали прочно утвердилась в практике металлургического производства. Опыт использования нового способа разливки стали привел к кардинальному переустройству сталеплавильного и существенным изменениям прокатного производств по причине очевидных преимуществ, таких как снижение энергозатрат, ускорение затвердевания, сокращение расхода металла на обрезки головной и донной частей. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

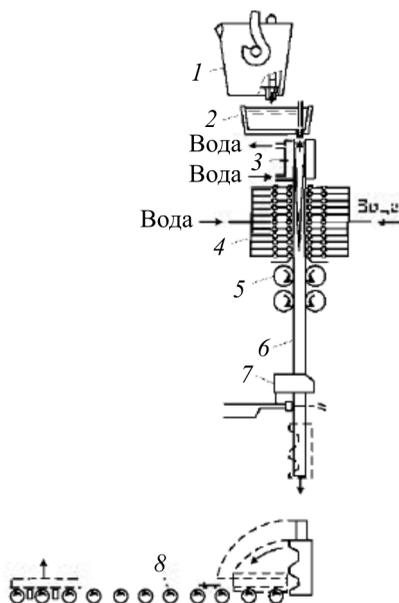


Рис. 1. Схема УНРС

3. Формализация задачи

3.1. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Уравнение теплопроводности, которое описывает процесс остывания слитка в УНРС, представляет собой ДУЧП параболического типа. Уравнение имеет вид

$$(1) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q(x, y, t)$$

или

$$(2) \quad c(x, y, t) \rho(x, y, t) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(y) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + f(x, y, t),$$

где

x, y – координаты в пространстве;

T – вектор распределения температуры (неизвестен);

t – дискретное время;

k – коэффициент теплопроводности (Вт/м·°С);

c – коэффициент теплоемкости (Дж/°С);

ρ – поверхностная плотность (кг/м³).

Так как уравнение содержит только первую производную по времени, то начальные условия задаются только для искомой функции,

$$(3) \quad T(x, y, t_0) = \varphi(x, y).$$

В первой краевой задаче на границе области определения задаётся температура или концентрация диффундирующего вещества:

$$(4) \quad T(x, 0, t) = T_1(x, t),$$

$$(5) \quad T(x, l_y, t) = T_2(x, t),$$

$$(6) \quad T(0, y, t) = T_3(y, t),$$

$$(7) \quad T(l_x, y, t) = T_4(y, t).$$

Во второй краевой задаче на границе задается поток тепла с граничными условиями третьего рода, описывающими конвективный теплообмен:

$$(8) \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} l_x - k \frac{\partial T}{\partial y} l_y = h(T_f - T),$$

где

l_x, l_y – длина граничащего участка (м);

h – коэффициент теплообмена ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

T_f – температура среды ($^\circ\text{C}$).

При этом коэффициент теплообмена варьируется в зависимости от прохождения определенных зон УНРС: если в зоне охлаждения непосредственно форсунками (длинная сторона) его принять за h , то в зоне свободного течения воды (широкая сторона) этот коэффициент составит примерно $h/3$, а в случае контакта длинной стороны с роликами – наоборот, возрастает до $2h$.

С целью получения большей достоверности результатов моделирования были построены зависимости коэффициентов теплоемкости и теплопроводности от температуры. Пример зависимостей для одной из марок стали представлен на рис. 2 и 3.

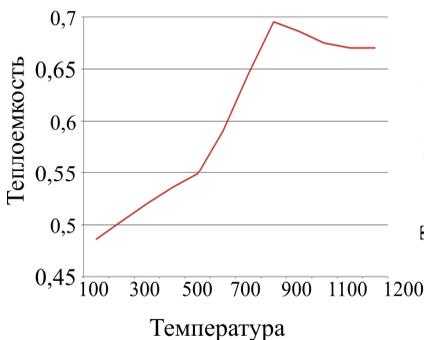


Рис. 2. Зависимость теплоемкости от температуры

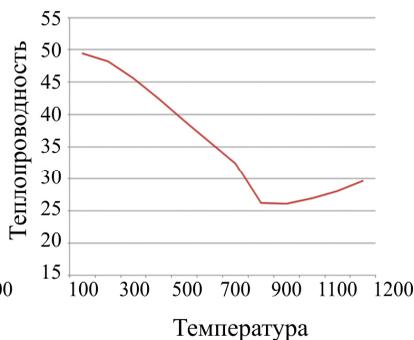


Рис. 3. Зависимость теплопроводности от температуры

3.2. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для дискретного решения уравнения теплопроводности в рамках поставленной задачи был применен метод конечных элементов ввиду его безусловной устойчивости и произвольной обрабатываемой области.

В ходе решения область разбивается на примитивы (в данном случае использовались треугольники), в которых каждой точке ставится в соответствие числовое значение. Такая формация, именуемая двумерным симплекс-элементом, показана на рис. 4. Затем решаются локальные уравнения в соответствии с искомыми величинами.

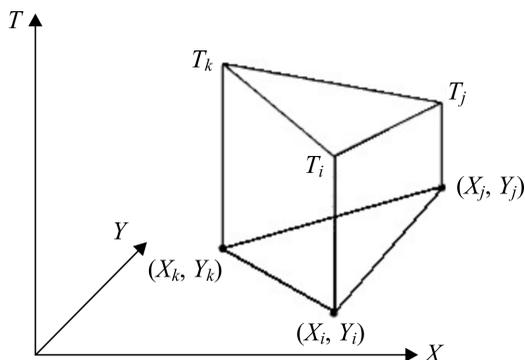


Рис. 4. Двумерный симплекс-элемент

Узловые значения скалярной величины T обозначаются через T_i , T_j и T_k , а координатные пары трех узлов – через (X_i, Y_i) , (X_j, Y_j) и (X_k, Y_k) .

4. Программная реализация

Программное обеспечение написано на языке C++ стандарта 2017 г. Графический интерфейс пользователя реализован на основе фреймворка Qt. Такой подход обеспечивает кроссплатформенность, отсутствие коммерческих элементов и использование передовых средств языка в исходных кодах.

Концепция работы состоит в дискретизации одномерного времени движения и двумерного пространства среза слитка. Значения температурного поля на выходе УНРС последовательно меняются по мере перемещения среза слитка от условно равномерной температуры до расплава металла в центре и твердой корочки на границе.

Указанное программное обеспечение учитывает взаимодействие слитка с такими элементами конструкции, как кристаллизатор и ролики, а также интенсивность теплообмена с водой, распыляемой форсунками вторичного охлаждения.

Назначение программного продукта состоит в проведении тестирования новых режимов работы оборудования без задействования производственных мощностей. Такой подход позволяет свести к минимуму вероятность появления дефектов продуктов разлива при проведении анализа изменения параметров работы УНРС, приводящих к повышению производственных мощностей с сохранением качества.

Пример дискретизации области поперечного среза слитка представлен на рис. 5.

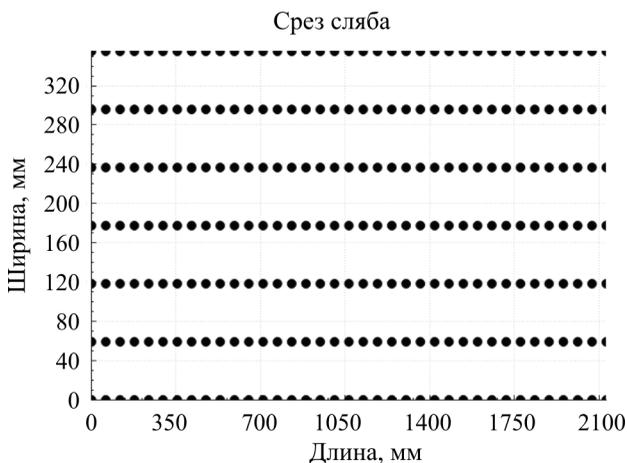


Рис. 5. Дискретизация сечения

Отображение температурного поля на выходе из установки производится во вкладке «результаты». Пример представления решения показан на рис. 6.

Для оценки динамики изменения температуры по длинной стороне слитка, которая наиболее подвержена трещинам, а также определения зоны возникновения трещин добавлена вкладка «охрупчивание», представленная на рис. 7. Пересечение зоны

Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами

возникновения трещин и зоны охрупчивания будет указывать на возникновение трещин при выбранном режиме.

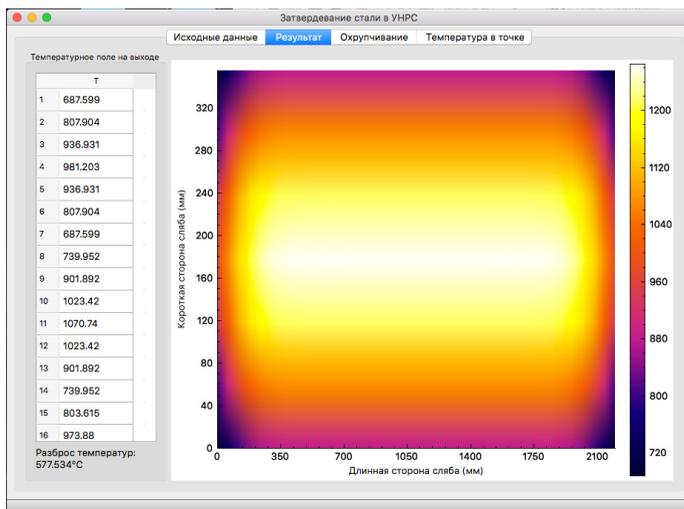


Рис. 6. Температура слэба на выходе из установки

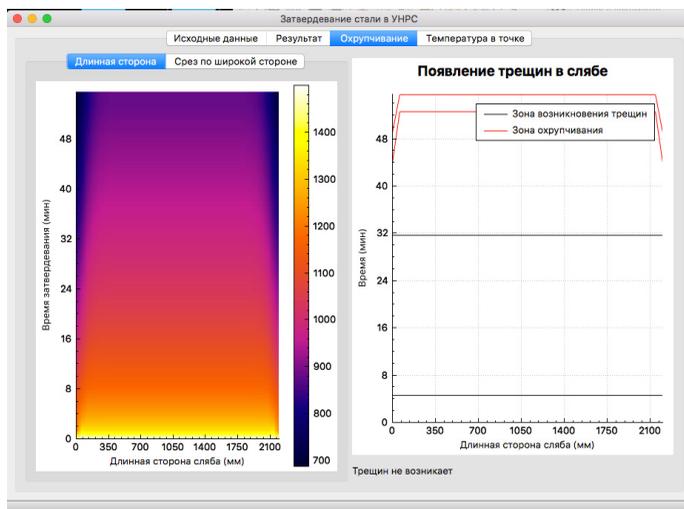


Рис. 7. Изменение температуры длинной стороны

С целью наиболее полного вывода полученной информации была добавлена возможность построения графика изменения температуры для конкретной исследуемой точки (рис. 8).

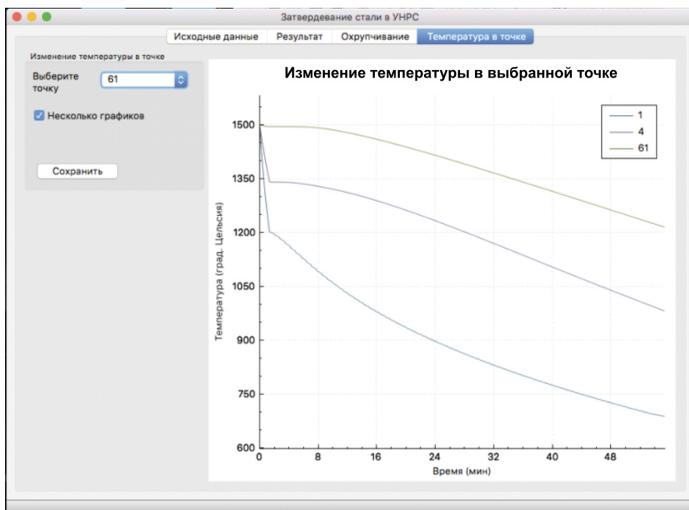


Рис. 8. Температура в точках

При сравнении результатов моделирования с реальными измерениями была установлена их непротиворечивость. Таким образом, разработано программное обеспечение, реализующее расчет температурного поля слитка в УНРС, а также сопоставляющее зоны охрупчивания с расположением слитка, что позволяет прогнозировать появление дефектов.

Литература

1. БЕРЕСТЮКОВ Е.В. *Производство непрерывнолитых слэбов из конвертной стали* / ОАО «НЛМК». – Липецк, 2016. – 258 с.
2. ЗИНКЕВИЧ О.С. *Метод конечных элементов в технике / пер. с англ.* – М.: Мир, 1975. – 539 с.
3. ПАРШИН В.М., БУЛАНОВ Л.В. *Непрерывная разливка стали* / ОАО «НЛМК». – Липецк, 2011. – 221 с.

4. РУМЯНЦЕВ А.В. *Метод конечных элементов в задаче теплопроводности*: учеб. пособие. – Калининград: Изд-во Калинингр. ун-та, 1995. – 170 с.
5. СЕГЕРЛИНД Л. *Применение метода конечных элементов*. пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 539 с.
6. ГАЛКИН А.В., КУЗИНА Н.Е., ПИМЕНОВ В.А. *Математическое моделирование теплового режима процесса остывания и затвердевания слитка в УНРС // Управление большими системами (УБС'2014) / ИПУ РАН. – М., 2014. – С. 961–972.*
7. ТИХОНОВ А.Н., САМАРСКИЙ А.А. *Уравнения математической физики*: учеб. пособие. – 5-е изд. – М.: Наука, 1977. – 742 с.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR SIMULATION THE COOLING PRECESS IN A CONTINUOUS CASTING PLANT (THE STEEL CONTINUOUS CASTING PLANT)

Alexander Galkin, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, candidate of technical sciences, assistant professor (avgalkin82@mail.ru).

Tyrin Dminry, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, student (dimedrius@mail.ru).

Pimenov Vladimir, NLMK, Lipetsk, candidate of technical sciences, senior researcher (pimenov_va@nlmk.com).

Abstract: In that work we study the dynamics of the change in the temperature of a slab during the passage of a continuous steel casting machine by simulation in a computer. Presented mathematical model of ingot cooling in the steel continuous casting plant and realizing this software model with visualization of the slab temperature field.

Keywords: steel continuous casting plant, finite element technique, heat equation.

РЕАЛИЗАЦИЯ САМОСИНХРОННЫХ СХЕМ НА ПЛИС

А.В. Греков¹, Ю.Р. Федосюк², В.Г. Пацура³

*(Пермский военный институт войск
национальной гвардии Российской Федерации, Пермь)*

В статье рассмотрены особенности построения самосинхронных схем при использовании программных логических интегральных схем (ПЛИС), приведена их классификация, а также проанализированы основные отличия от синхронного подхода к проектированию. Приводится анализ факторов, влияющих на скорость работы схем, и рассмотрены преимущества и недостатки самосинхронных схем. Использование программируемых логических интегральных схем способствует созданию гибкой и эффективной системы управления.

Ключевые слова: самосинхронная схема, микропроцессор, программируемая логическая интегральная схема, цифровые схемы, анализ параметров.

До настоящего времени традиционным подходом к построению цифровых схем являлся синхронный подход (рис. 1) с использованием глобального дерева синхронизации (рис. 2). Синхронизация работы синхронных схем осуществляется при помощи глобальных цепей распространения тактового сигнала (тактового дерева).

С увеличением размера кристалла и сложности схемы разработка такого тактового дерева становится затруднительной.

¹ *Артём Владимирович Греков, кандидат технических наук (grekar-temvl@mail.ru).*

² *Юрий Романович Федосюк, курсант.*

³ *Виктория Геннадьевна Пацура, курсант (patsura_v@mail.ru).*

Большое количество буферных элементов и длинные соединительные линии вызывают расфазировку и дрожание фронта тактового сигнала на тактовых входах триггерных элементов схемы, из-за чего в итоге происходит задержка во времени распространения сигналов от триггера до триггера и снижается быстродействие.

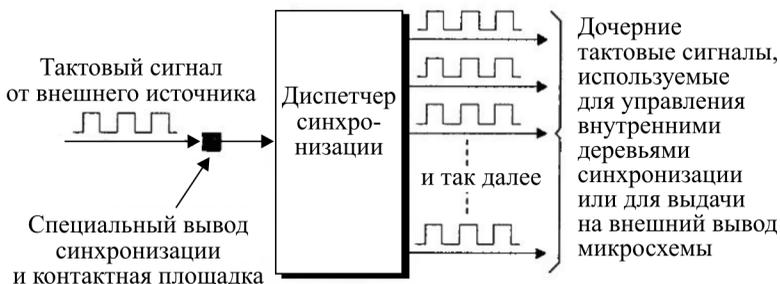


Рис. 1. Синхронный подход к проектированию схем



Рис. 2. Глобальное дерево синхронизации

Одним из способов решения этой проблемы является использование локальных методов тактирования, к которым относится самосинхронизация. Особенностью самосинхронных схем является отсутствие глобальных тактовых сигналов, используемых в синхронной схемотехнике.

Самосинхронная схемотехника (рис. 3) является одним из способов локального решения проблемы синхронизации работы схемы. В отличие от синхронного подхода к проектированию, где для синхронизации работы схемы используется глобальная цепь распространения тактового сигнала с высокими требованиями к расфазировке и дрожанию фронта, в самосинхронных

схемах синхронизация работы осуществляется за счет непосредственного определения моментов окончания переходных процессов в отдельных блоках схемы и использования этих сигналов для синхронизации соседних блоков. Таким образом, скорость работы схемы определяется исключительно задержками распространения сигнала в схеме и является максимально возможной для текущих условий (температуры, напряжения питания), параметров полупроводниковой структуры и обрабатываемых данных.

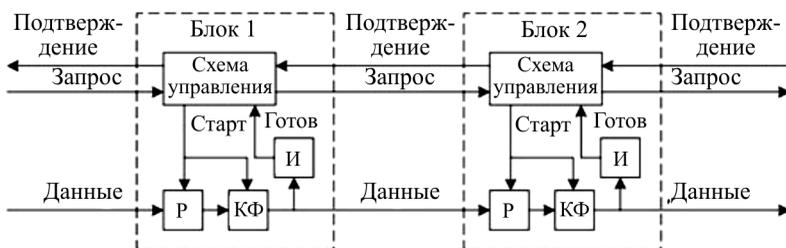


Рис. 3. Построение самосинхронной схемы

При самосинхронном подходе (рис. 4) каждый комбинационный блок после завершения переходных процессов должен вырабатывать сигнал готовности приема следующих данных, по которому осуществляется синхронизация предыдущих блоков, обеспечивая тем самым логическое упорядочивание событий в схеме.



Рис. 4. Самосинхронный подход к проектированию схем

Блок, вырабатывающий сигнал окончания переходного процесса, называется блоком индикации. Данные между логическими блоками передаются с применением некоторого протокола передачи, который обеспечивает синхронизацию информации. В задачу протокола входит сопровождение передаваемых

данных парой «запрос/подтверждение», которая обеспечивает синхронизацию на локальном участке схемы.

Разработчикам синхронных схем не нужно отслеживать порядок прохождения данных через блоки – это делается автоматически при использовании глобального тактового сигнала и проверке соблюдения ограничений проекта. Поскольку в самосинхронных схемах отсутствуют тактовые сигналы, такие схемы характеризуются низким уровнем электромагнитного излучения, которое возникает в синхронных схемах в результате пиков потребления мощности при одновременном переключении большого количества триггеров по фронту тактового сигнала. В самосинхронных схемах переключение элементов происходит не периодически с какой-то частотой, а по мере поступления данных, в различные моменты времени. Кроме того, эта особенность самосинхронных схем приводит к уменьшению пикового тока потребления схемы, что может иметь большое значение для устройств без собственного источника питания, например меток радиочастотной идентификации.

Можно выделить два типа самосинхронных схем.

1. Строгосамосинхронные схемы – являются полностью нечувствительными к задержкам (Delay-Insensitive), не создают никаких временных ограничений и задержек распространения сигнала. В индикаторных блоках схемы реализован непосредственный контроль окончания переходных процессов.

2. Квазисамосинхронные схемы – в данном классе схем нет непосредственного контроля окончания переходного процесса. Одним из способов реализации таких схем является использование линий задержки для оценки времени окончания переходного процесса. Задержка должна соответствовать худшему случаю работы части схемы [4]. Такое решение, в отличие от синхронных схем, где скорость работы соответствует наихудшему случаю работы всей схемы, позволяет ограничить скорость работы наихудшим случаем работы только отдельного блока.

Для реализации самосинхронной схемы используют программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС).

FPGA (Field programmable gate arrays) или ПЛИС – цифровые интегральные схемы, которые представляют собой набор

программируемых логических блоков и программируемых соединений между этими блоками.

В настоящее время технология ПЛИС используется довольно узким кругом специалистов. В основном ПЛИС используются для прототипирования микросхем и для мелкосерийных изделий, когда изготовление микросхем на основе ASIC (Application-specific integrated circuit) – интегральная схема специального назначения – экономически нецелесообразно.

Основное отличие ПЛИС от микропроцессора – возможность создавать устройства с произвольной внутренней структурой. Упрощенно ПЛИС представляет собой набор определенных функциональных ячеек (макроячеек), соединение между которыми осуществляется с помощью программируемых пользователем ключей. Для хранения таблицы соединений используется специальная конфигурационная память. ПЛИС позволяет создавать законченное быстродействующее устройство на базе единственной микросхемы.

Помимо набора жесткой логики на кристалле, которая повышает быстродействие, ПЛИС содержит: блоки ввода/вывода, позволяющие использовать практически любой внешний вывод ПЛИС в качестве входа/выхода, блочную память, контроллер JTAG (Joint Test Action Group) и контроллер программирования flash-ПЗУ, процессорное ядро, тактовый генератор, выделенные умножители накопители и т.д.

В настоящее время не существует стандартизированного метода оценки ПЛИС, который разработчики могли бы использовать при выборе этого компонента для своих приложений [2]. Каждый производитель ПЛИС утверждает, что его компонент имеет несколько большее быстродействие, требует для компиляции несколько меньше времени и потребляет несколько меньшую мощность и т.д. Кроме того, любая компания способна придумать такие показатели, с помощью которых ее компоненты будут выглядеть гораздо лучше по сравнению с конкурирующими устройствами. Возникает вопрос, какие показатели отражают реальные характеристики, а какие служат лишь маркетинговым целям?

Компания Altera производит оценку ПЛИС с помощью программного средства разработки Quartus II, используя ком-

плексный набор типовых проектов заказчика, которые отражают различные области применения, например сетевые технологии, телекоммуникации, беспроводная и бытовая техника. К тому же проекты реализованы на основе различной технологии, например ASIC, вентильные матрицы и ПЛИС других производителей. Отобранные проекты (которые хранятся в защищенной базе данных) используются для того, чтобы сравнить функционирование реальных устройств заказчиков с разрабатываемой в текущий момент архитектурой. Проекты, не оптимизированные для ПЛИС компании Altera, оцениваются по результатам более 150 тыс. тестов [1]; затем на основе анализа предлагаются рекомендации по совершенствованию архитектуры следующих поколений ПЛИС или инструментов разработки.

На основе указанного процесса анализа (и учитывая тот факт, что в настоящее время отсутствует стандартизованный процесс тестирования и оценки) компания Altera разработала собственную объективную методику оценки, которая основана на реальных проектах и одобрена отраслевыми экспертами. Однако возникает проблема: имеющиеся проекты являются собственностью заказчиков Altera, и компания не может предоставить их другим заказчикам для оценки своих ПЛИС [3]. Несмотря на то, что все понимают смысл этого ограничения, возникает определенный скептицизм конечных пользователей. Например, из-за того что разработчики не имеют возможности собственноручно проверить утверждение, что ПЛИС семейства Stratix III в среднем на 35 % быстрее ПЛИС Virtex-5, компилируется в три раза быстрее, чем ПЛИС Virtex-5, а коэффициент заполнения кристалла в среднем равен 95 %, оно воспринимается скептически.

Для сравнительного анализа были отобраны семь наиболее популярных и крупных проектов на интернет-ресурсе www.opencores.org, которые представлены в табл. 1.

Для тестирования были использованы FPGA компаний Altera и Xilinx с наибольшей логической емкостью и близкими параметрами. В табл. 2 приведены данные о выбранных для сравнения FPGA компаний Altera и Xilinx, а также о соответствующем программном обеспечении.

Таблица 1. Проекты OpenCores

Проекты OpenCores	Число логических элементов (ЛЭ)	Число адаптивных логических модулей (АЛМ)
os_aquarius (микропроцессорное ядро SuperH-2)	6475	2590
os_des_des3perf9 (криптографическое ядро DES3)	15670	6268
os_ethernet (ядро EthernetMAC)	3548	1419
os_oc8051 (микропроцессорное ядро 8051)	4115	1646
os_or1k (микропроцессорное ядро OpenRISC)	7028	2811
os_pci (интерфейс PCI)	3630	1452
os_usb_func (ядро USB 2.0)	4318	1727

Таблица 2. Сравнимые ПЛИС компаний Altera и Xilinx

ПЛИС	Altera	Xilinx
Тип FPGA	EP3S340-3	XC5VLX330-2
Программное обеспечение	Quartus II v8.0	ISE 9.2i SP4
Показатель скорости	Средний	Средний

Отдельно взятые проекты OpenCores слишком малы для реализации на крупных ПЛИС (таких как EP3S340 компании Altera и XC5VLX330 компании Xilinx). Для того чтобы максимально заполнить ПЛИС и смоделировать влияние увеличения сложности проекта на производительность, коэффициент заполнения и время компиляции, в ПЛИС было реализовано копирование проектов OpenCores (путем повторения копий ядер проекта до полного заполнения устройства, насколько это допускалось программным средством разработки). При анализе и копировании проектов были соблюдены следующие условия:

- каждый блок копии проекта был подключен параллельно;
- для уменьшения числа линий ввода/вывода при усложнении проекта была использована логика свертки (сдвиговые регистры на входе и выходе);

– отсутствовали каналы с критичным временным режимом между ядрами и логикой свертки;

– логика свертки обеспечила весьма небольшие аппаратные издержки (<3 %); она была реализована путем параллельного подключения при отсутствии цепей с критичным временным режимом между ядрами и внутри самой логики.

Проекты OpenCores были скопированы в ПЛИС столько раз, сколько допускалось емкостью прибора и программными средствами, поэтому при компиляции не было зафиксировано ошибок. Производительность, коэффициент заполнения и время компиляции ПЛИС фиксировались с интервалом в пять копий проекта OpenCores для каждого типа ПЛИС.

Литература

1. МАРАХОВСКИЙ В.Б., МЕЛЕХИН В.Ф. *Проектирование средств синхронизации блоков глобально асинхронных систем с произвольной локальной синхронизацией* // Информационно-управляющие системы. – 2010. – № 1. – С. 29–38.
2. СУРКОВ А.В. *Использование Synopsys Design Compiler для синтеза самосинхронных схем* // Программные продукты и системы. – 2014. – № 4. – С. 24–30.
3. VARSHAVSKY V.I., MARAKHOVSKY V.B., CHU T.A. *Asynchronous Timing of Arrays with Synchronous Prototype* // Proc. 2nd Intern. Conf. on Massively Parallel Computing Systems. – 1996. – P. 47–54.
4. SUTHERLAND I.E. *Micropipelines. Communication of ACM.* – June 1989. – Vol. 32. – No. 6. – P. 720–738.

IMPLEMENTATION OF SELF-TIMED CIRCUITS ON FPGA

Grekov Artem Vladimirovich, Perm Military Institute of National Guard Troops, Perm, associate professor (grekartemvl@mail.ru).

Yuriy Fedosuyk, Perm Military Institute of National Guard Troops, Perm, cadet.

Victoria Patcura, Perm Military Institute of National Guard Troops, Perm, cadet (patsura_v@mail.ru).

Abstract: The article is devoted to various aspects of the construction of a syndicated approach to the use of system logical integrated circuits, their classification and main differences from the synchronous approach are given. An analysis of the factors affecting the speed of operation of the circuits is presented, and the advantages and disadvantages of self-timed circuits are considered. The article describes the types of programmable logic integrated circuits and the ways of their construction, as well as the main manufacturers of field programmable gate arrays. The resulted schemes of construction of self-timed circuits on the basis of programmable logic integrated circuits. They studied the fundamental differences between a programmable logic circuit and a microprocessor in electronics. The analysis of used elements for construction of self-timed circuits is given. The use of programmable logic integrated circuits facilitates the creation of a flexible and efficient management system in any field of activity.

Keywords: Self-timed circuit, microprocessor, field programmable gate arrays, digital circuits, parameter analysis.

УДК 681.32
ББК 32.97

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКИ

**Вихорев Р.В.¹, Прохоров А.С.²,
Скорнякова А.Ю.³, Тюрин С.Ф.⁴**
*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

В статье рассматриваются усовершенствованные методы реализации логических элементов в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) на основе деревьев передающих транзисторов – LUT (Look upTable), реализующих логическую функцию, заданную в совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ), а также на основе программируемых логических матриц (ПЛМ), реализующих логические функции в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ). С целью повышения эффективности реализации логики в статье предлагаются усовершенствованные варианты реализации систем функций в СДНФ, самосинхронные реализации вычисления логических функций в СДНФ и ДНФ, а также отказоустойчивые схемы программируемой логики.

Ключевые слова: логическая функция, самосинхронная схема, отказоустойчивость.

¹ Руслан Владимирович Вихорев, аспирант, инженер-конструктор (vihrusvla@gmail.com).

² Андрей Сергеевич Прохоров, аспирант, программист (прохор007@yandex.ru).

³ Александра Юрьевна Скорнякова (Плотникова), аспирант, инженер-проектировщик (juris-plot@mail.ru).

⁴ Сергей Феофанович Тюрин, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ (tyurinsergfeo@yandex.ru).

1. Введение

В аппаратуре управления техническими системами с 70-х годов XX века широко применяются микросхемы программируемой логики [1]. Программирование сначала было однократным, на заводе-изготовителе, затем появилась возможность программирования пользователем с помощью специального программатора. Потом были разработаны электрически перепрограммируемые логические матрицы, реализующие логические функции в ДНФ. В настоящее время они также используются в составе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа CPLD (complex programmable logic devices) [1, 9]. В ПЛИС типа FPGA (field-programmable gate array) используется реализация в СДНФ в виде дерева передающих транзисторов [5, 6]. В ряде областей требуется высоконадежные устройства программируемой логики [10]. Для этого могут быть использованы так называемые функционально-полные толерантные элементы [11], а также самосинхронные схемы [4].

Целью работы является разработка устройств программируемой логики, обладающих улучшенными характеристиками реализации логических функций в СДНФ и в ДНФ.

Задачи:

1. Усовершенствовать реализацию систем логических функций в СДНФ на базе LUT.
2. Предложить самосинхронные реализации систем логических функций в СДНФ на базе LUT.
3. Повысить отказоустойчивость СДНФ и ДНФ реализаций программируемой логики.

2. Реализация логической функции, заданной в СДНФ

Логическая функция n переменных x , реализуемая на выходе дерева передающих транзисторов LUT (Look Up Table) ПЛИС FPGA [1, 5, 9], может быть представлена следующим образом:

$$(1) \quad \bar{z}_{out} = \bigvee_{i=1}^{2^n} \left(\bigg\&_{j=1}^n x_j^{\sigma(i-1,j)} \cdot \bar{d}_i \right),$$

где $\sigma(i, j)$ – показатель инверсирования переменной в соответствующей ветви дерева передающих транзисторов, его значение противоположно значению j -го разряда в двоичной записи числа i ; $d_i \in \{0, 1\}$ – значение i -й конфигурационной ячейки SRAM.

Для реализации самосинхронного LUT-ST предложено выражение [9]

$$(2) \quad \begin{cases} Z_{out.l.ST} = \bigvee_{i=0}^{2^n-1} \left(\big\&_{j=1}^{2n} X_j^{\sigma(i-1,j)} \cdot D_i \right) \vee \left(\big\&_{\mu=1}^n X_\mu X'_\mu \right)', \\ Z'_{out.l.ST} = \bigvee_{i=0}^{2^n-1} \left(\big\&_{j=1}^{2n} X_j^{\sigma(i-1,j)} \cdot \bar{D}_i \right) \vee \left(\big\&_{\mu=1}^n X_\mu X'_\mu \right)', l=1, m, \\ I = \overline{Z_{out.l.ST} \cdot Z'_{out.l.ST}}, \end{cases}$$

где $\big\&_{\mu=1}^n X_\mu X'_\mu$ – цепочки реализации Спейсера, I – индикатор окончания переходного процесса.

Парирование r отказов по некоторой i -й переменной предполагает реализацию выражения

$$(3) \quad \bar{Z}_{out.ft} = \bigvee_{i=1}^{2^n} \left(\big\&_{j=1}^n \left[\bigvee_{\chi=1}^{r+1} \left(\big\&_{\chi=1}^{r+1} x_{i,\chi} \right) \right]^{\sigma(i-1,j)} \cdot \bar{d}_i \right).$$

При этом затраты по каждой переменной в каждой ветви дерева возрастают с 1 до $(r+1)^2$. Вероятность безотказной работы транзисторов по каждой переменной для экспоненциальной модели (модели Вейбулла) имеет вид

$$(4) \quad \sum_{i=0}^r C_{(r+1)^2}^i \left\{ e^{-[(r+1)^2-i]\lambda \cdot t^\alpha} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha})^i \right\},$$

где λ – интенсивность отказов одного канала; α – коэффициент распределения Вейбулла; $1 \leq \alpha \leq 2$; t – время работы; r – число парлируемых отказов.

Однако выражения (1)–(4) справедливы лишь до ограничения $n = < d$ в связи с требованиями Мида–Конвей на число последовательно соединённых транзисторов r , их не может быть больше d ; если больше, то необходимо восстанавливать сигнал, например, используя инверторы [8]. На современном уровне технологии, как правило, $d = 4$. То есть требуется декомпозиция дерева (1) передающих транзисторов по d . При декомпозиции сложного дерева по k -LUT, $k \in \{1, 2, 3, 4 \dots d\}$, $n > k$

$$(5) \quad L_{n,k} = 2^{\lfloor n \rfloor} \cdot 8 + (2^{\lfloor k \rfloor + 1} + 6 \lfloor k \rfloor) \cdot \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \rfloor} 2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor i \rfloor \cdot \lfloor k \rfloor} + \\ + (2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \rfloor \cdot \lfloor k \rfloor + 1} + 6 \cdot \left(\lfloor n \rfloor - \left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor \cdot \lfloor k \rfloor \right)) + 6 \lfloor n \rfloor,$$

где $2^{\lfloor k \rfloor + 1} + 6 \lfloor k \rfloor$ – сложность одного k -дерева; $\lfloor \dots \rfloor$ – округление в нижнюю сторону (floor); таких деревьев (k -LUT) необходимо в первом слое $2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor k \rfloor}$, затем нужно провести декомпозицию k -LUT этого первого слоя, получаем $2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor k \rfloor - \lfloor k \rfloor}$. Всего необходимо i k -LUT, где i определяется из соотношения $\lfloor i \rfloor = \left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor$ всего

$$\sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor} 2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor i \rfloor \cdot \lfloor k \rfloor} \text{ и последний LUT на } \lfloor n \rfloor - \left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor \cdot \lfloor k \rfloor \text{ переменных.}$$

Таким образом, получим вероятность безотказной работы отказоустойчивого LUT с резервированием каждого транзистора:

$$(6) \quad P(t)_{LUT,FT} = \left[\sum_{i=0}^r C_{(r+1)^2}^i \{ e^{-[(r+1)^2 - i] \cdot \lambda \cdot t^\alpha} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha})^i \} \right]^{L_{n,k}}.$$

Необходимо также оценивать временную задержку в количестве транзисторов. Соответствующее выражение имеет вид

$$(7) \quad T_{n,k} = n + 2 \left\lceil \frac{n}{k} \right\rceil + 2 \cdot \left[\left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor \right].$$

Очевидно, что должно выполняться условие $(r + 1) \leq d$. Так, для парирования одного отказа при $d = 4$ возможна декомпозиция по не более чем 1-LUT ($k = 1, 2$).

3. Реализация систем логических функций, заданных в СДНФ

Для реализации системы из m логических функций в предложенной ПЛИС FPGA [8] необходимо

$$(8) \quad \bar{z}_{out.l} = \bigvee_{i=1}^{2^n} \left(\big\&_{j=1}^n x_j^{\sigma(i-1,j)} \cdot \bar{d}_i \right); l = 1, m.$$

Ортогональность обеспечивается ($\bar{d}_{in} = 1$) в случае

$$(9) \quad d_{out.i} = \big\&_{j=1}^n (x_j^{\sigma(i-1,j)} \vee x_j^{\bar{\sigma}(i-1,j)}); i = 1, 2^n.$$

Выражение (9) описывает обеспечение ортогональности по каждой переменной в каждой ветви дерева. Для реализации систем логических функций в СДНФ на основе дешифратора разработан элемент DC LUT-ST, описываемый выражением

$$(10) \quad \begin{aligned} D_{out.i} &= \big\&_{j=1}^n (\bar{D}_{in} \cdot X_j^{\sigma(i,j)} \vee D_{in} \cdot X_j^{\bar{\sigma}(i,j)}) \vee (\big\&_{\mu=1}^n X_{\mu} X'_{\mu}); \\ D'_{out.i} &= \big\&_{j=1}^n (D_{in} \cdot X_j^{\sigma(i,j)} \vee \bar{D}_{in} \cdot X_j^{\bar{\sigma}(i,j)}) \vee (\big\&_{\mu=1}^n X_{\mu} X'_{\mu}); \\ I &= [(D_{out.i})(D'_{out.i})]'; i = 0, 2^n - 1. \end{aligned}$$

Предлагаемая отказоустойчивая реализация имеет вид

$$(11) \quad d_{out.i} = \big\&_{j=1}^n \left[\bigvee_{\chi=1}^{r+1} (\big\&_{\chi=1}^{r+1} x_{i,\chi}) \right]_j^{\sigma(i-1,j)} \vee \left[\bigvee_{\chi=1}^{r+1} (\big\&_{\chi=1}^{r+1} x_{i,\chi}) \right]_j^{\bar{\sigma}(i-1,j)}; i = 1, 2^n.$$

Для программирования значений m логических функций предлагается

$$(12) \quad z_{\theta} = \bigvee_{i=1}^{2^n} \left(\left[\bigvee_{\chi=1}^{r+1} (\big\&_{\chi=1}^{r+1} d_{i,\chi}) \right]_{out.i} \cdot \left[\bigvee_{\chi=1}^{r+1} (\big\&_{\chi=1}^{r+1} h_{i,\chi}) \right]_{l,i} \right); l = 1, m.$$

где h – настройка вхождения конституент i в данную функцию z_{θ} из m функций системы.

4. Реализация систем логических функций, заданных в ДНФ

Программирование по i -й переменной j -й функции, зависящей от одной переменной с учётом её возможного инверсного значения, может быть представлено следующим образом [1, 9]:

$$(13) \quad f_j = (x_i \vee s_i)(\bar{x}_i \vee \bar{s}_i).$$

Для функции, содержащей n переменных получим

$$(14) \quad f_j = \bigwedge_{i=1}^n (x_i \vee s_i)(\bar{x}_i \vee \bar{s}_i); j = 1, k.$$

Причём для s выполняются следующие условия: $s_i \bar{s}_i = 0$; $s_i \vee \bar{s}_i = 1$ для существенной переменной, $s_i \bar{s}_i = 1$ для несущественной переменной.

Сравнение сложности логических элементов LUT – $L(n)$ DC LUT – $Ldc(n)$ при декомпозиции с $k = 4$, $m = 8$ представлено на рис. 1.

Сравнение вероятностей безотказной работы LUT и DC LUT исходя из сложности изображено на рис. 2.

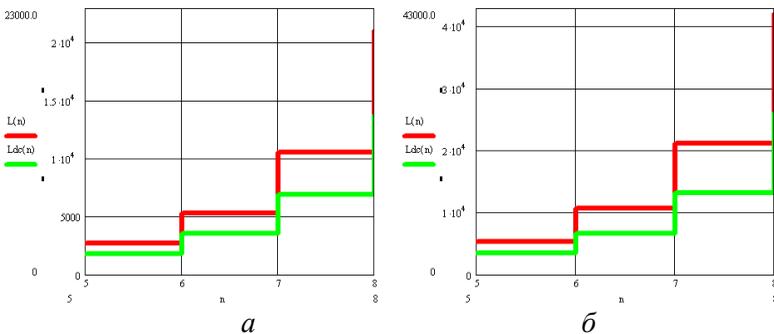


Рис. 1. Сравнение сложности логических элементов LUT – $L(n)$ DC LUT – $Ldc(n)$ при декомпозиции $a - k = 4, m = 8$; $b - k = 4, m = 16$

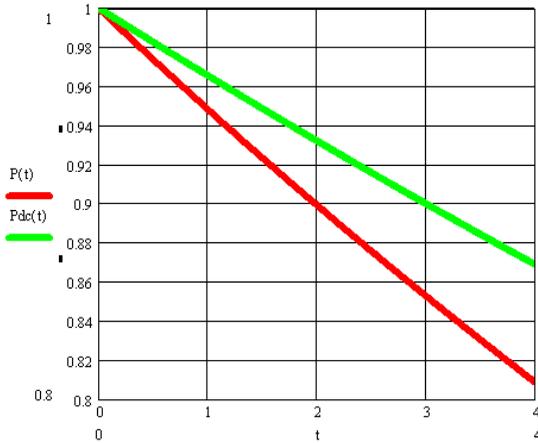


Рис. 2. Графики изменения вероятности безотказной работы – схемы LUT $P(t)$ и вероятности безотказной работы DC LUT $P_{dc}(t)$ при интенсивности отказов (сбоев) $\lambda = 10^{-5}$ 1/час, $n = 6$, $k = 4$, $m = 8$

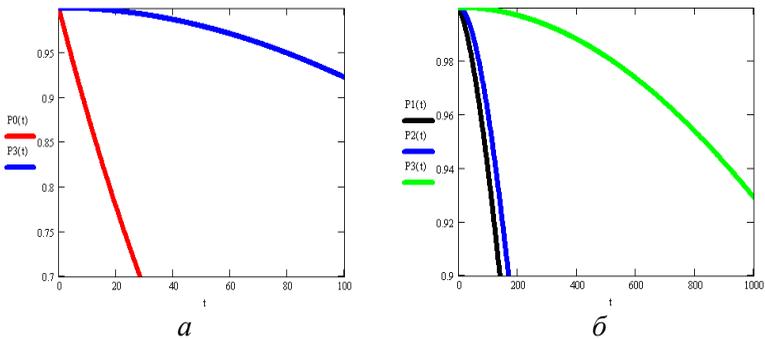


Рис. 3. Сравнение вероятностей безотказной работы нерезервированного логического элемента (P_0), троированного логического элемента (P_1); троированного элемента с тремя мажоритарными (P_2) и предлагаемого отказоустойчивого устройства (P_3)

5. Заключение

Предлагаемый DC-LUT FPGA предпочтительней по аппаратным затратам, чем известный LUT уже при количестве функций $m = 8$ для числа переменных $n = 4$. Самосинхронная реализация LUT и DC-LUT позволяет обеспечить самопроверяемость логики и унифицировать проектирование самосинхронных схем. В перспективе целесообразно рассмотреть вопрос проектирования самосинхронной FPGA с учётом программирования матриц связей. Отказоустойчивые реализации логики целесообразно использовать в высоконадёжной аппаратуре, в том числе специальной. В дальнейшем рекомендуется учесть возможность работы LUT на одной из половин дерева транзисторов с целью дальнейшего повышения отказоустойчивости.

Литература

1. *Виды программируемой логики* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pvsm.ru/programmirovanie/87810> (дата обращения: 10.06.2017).
2. *Программируемое логическое устройство*: пат. Рос. Федерация № 2602780 / ТЮРИН С.Ф., ВИХОРЕВ Р.В., ПЛОТНИКОВА А.Ю. 2016. Бюл. № 32.
3. *Программируемое логическое устройство*: пат. Рос. Федерация № 2573732 / ТЮРИН С.Ф., ВИХОРЕВ Р.В. 2016. Бюл. № 3.
4. СТЕПЧЕНКОВ Ю.А. *Самосинхронный вычислитель для высоконадёжных применений* // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС): сб. тр. всерос. науч.-техн. конф. / Ин-т проблем проектирования в микроэлектронике РАН. – 2010. – № 1.
5. СТРОГОНОВ А., ЦЫБИН С. *Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри* [Электронный ресурс] // Журнал «Компоненты и технологии». – URL: http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010_11_56.php (дата обращения: 16.12.2014).
6. ТЮРИН С.Ф. *Дерево транзисторов для реализации систем логических функций* // Вестник Пермского национального

- исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2015. – № 2 (14). – С. 37–45.
7. УГРЮМОВ Е.П. *Цифровая схемотехника: учеб. пособие.* – СПб: БХВ-Петербург, 2004. – С. 518
 8. УЛЬМАН ДЖ.Д. *Вычислительные аспекты СБИС: пер. с англ.: А.В. НЕЙМАНА / под ред. П.П. ПАРХОМЕНКО.* – М.: Радио и связь, 1990. – С. 480.
 9. CPLD (Complex Programmable Logic Device). – URL: <http://www.myshared.ru/slide/981511/> (accessed 9 Juny 2017).
 10. CARMICHAEL C. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs. – URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf (accessed 7 December 2016).
 11. TYURIN S.F. Retention of functional completeness of Boolean functions under “failures” of the arguments // Automation and Remote Control. – 1999. – Vol. 60. – No 9. – Part 2. – P. 1360–1367.

ADVANCED METHODS OF A PROGRAMMABLE LOGIC IMPLEMENTATION

Vikhorev Ruslan Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is a design engineer Public Joint-stock Company “Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company”, post-graduate student at the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: vihrusvla@gmail.com).

Prokhorov Andrey Sergeevich – is a programmer Joint-stock Company “ER-Telecom Holding”, postgraduate student at the Department of Automation and Telemechanics, Electrical Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University. (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: npoxop007@yandex.ru).

A. Yu. Skornyakova. (Perm, Russian Federation) is a structural engineer limited liability company “Intersist-Servis”, post-graduate student at the Department of Automation and Telemechanics Perm

National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: juris.plot@mail.ru).

Tyurin Sergey Feofentovich Perm National Research Polytechnic University, Perm, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automation and Telemechanics (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru).

Abstract: In the article are considered the improved methods for implementing logical elements in programmable logic integrated circuits (FPGAs) based on the LUT (Look up Table) – transistor trees realizing a logical function specified in a canonical disjunctive normal form (CDNF), as well as on the basis of programmable logic arrays (PLAs) realizing logical functions in disjunctive normal form (DNF). In order to increase the efficiency of the implementation of the logic, the article proposes improved variants of the implementation of function systems in the CDNF, self-timed implementation of the computation of logical functions in CDNF and DNF, as well as fault-tolerant schemes of programmable logic.

Keywords: Logic Function, Self-Timed Circuit, Fault Tolerance.

УДК 021.8 + 025.1
ББК 78.34

ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИЕЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ С ЦЕЛЮ МИНИМИЗАЦИИ АВАРИЙНОСТИ

Серкова Д.В.¹

*(Липецкий государственный технический
университет, Липецк)*

В работе рассмотрена задача определения оптимального плана модернизации водопроводной сети. В качестве критерия оптимальности выступает снижение аварийности. Построена модель определения аварийности сети за определенный период, составлены ограничения на имеющиеся финансовые ресурсы. Приведен пример расчета оптимального плана модернизации при использовании двух видов труб.

Ключевые слова: водопроводная сеть, надежность, оптимизация, модернизация.

1. Введение

Управление водопроводными системами является актуальной проблемой, так как водоснабжение является неотъемлемой частью жизнедеятельности человека. Среди важнейших отраслей, направленных на повышение уровня жизни людей, развитие промышленности, водоснабжение занимают лидирующую позицию. Водопроводные сети представляют собой комплекс трубопроводных систем, обеспечивающих снабжение водой различных потребителей. Одним из важных показателей водопроводных сетей являются надежность, качество и эффективность. При этом ставятся задачи сокращения затрат на эксплуатацию, минимизации аварийности систем при обеспечении снабжения потребителей качественным продуктом.

¹ Дарья Владимировна Серкова, студентка (dasha.serkowa@yandex.ru).

Таким образом, задача минимизации аварийности водопроводной сети в условиях ограниченности ресурсов является актуальной.

2. Система водоснабжения. Виды трубопроводов

Система водоснабжения – комплекс взаимосвязанных инженерных устройств и сооружений, обеспечивающий потребителей водой в требуемом количестве и заданного качества [1].

Одним из основных элементов системы водоснабжения является водопроводная сеть, она неразрывно связана с водопроводами, подающими воду в сеть.

Для эффективного водоснабжения водопроводная сеть должна соответствовать следующим требованиям:

- 1) обеспечивать подачу заданного количества воды к местам ее потребления под требуемым напором;
- 2) обладать достаточной степенью надежности и бесперебойности снабжения водой потребителей.

Помимо указанных требований, сеть должна быть запроектирована максимально экономично, т.е. обеспечивать наименьшую величину приведенных затрат на строительство и эксплуатацию как самой сети, так и неразрывно связанных с ней других сооружений системы.

Трубопровод – сооружение, состоящее из плотно соединенных между собой труб, деталей трубопроводов, запорно-регулирующей аппаратуры, контрольно-измерительных приборов, средств автоматики, опор и подвесок, крепежных деталей, прокладок, материалов и деталей тепловой и противокоррозионной изоляции и предназначенное для транспортировки жидких и твердых веществ [6].

В настоящее время существует большое разнообразие деталей и материалов для сооружения водопровода, позволяющее создавать более современные и качественные установки. В зависимости от конструкции, сложности, заложенных средств можно выбрать металлические или пластиковые трубы. Все они сильно различаются своими характеристиками, имеют ряд особых качеств, которые становятся основными при их отборе.

Традиционно трубы делятся на два вида:

1) металлические водопроводные (стальные, чугунные, медные);

2) пластиковые водопроводные (пластиковые, полибутиленовые, полиэтиленовые, из поливинилхлорида, полипропиленовые, металлопластиковые).

Рассмотрим характеристики каждого вида труб подробнее. Особенности монтажа металлических труб и их свойства зависят от свойств используемого материала. Металлические трубы обычно изготавливаются из стали, чугуна, меди.

Стальные трубы чаще всего используются при сооружении водопровода, поскольку они отличаются прочностью и надежностью, а также дешевы в изготовлении. В городских квартирах все стояки изготавливаются из стальных труб. На стальных трубах также монтируются радиаторы отопления. Однако их недостатком является подверженность коррозии, поэтому срок их службы 30–40 лет. Чтобы избежать повреждения труб, наносят цинковое покрытие снаружи и внутри [3]. Стальные трубы обладают высокой теплопроводностью, поэтому очень часто трубы холодного водоснабжения «потеют». На неровной внутренней поверхности стальных труб со временем нарастает накипь. Сталь – тяжелый материал, поэтому такие трубы довольно сложно монтировать.

Чугунные трубы в отличие от стальных труб способны сопротивляться коррозии. Технология производства труб из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом соединяет в себе прочность и коррозионную устойчивость чугуна с пластичностью стали. Пластичностью и устойчивостью на разрыв высокопрочный чугун с шаровидным графитом обладает благодаря присутствующим в нем шарикам графита, которые препятствуют распространению трещин в структуре чугуна.

Свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) получены при модификации жидкого чугуна магнием и дополнительными присадками. В результате модифицирования графит в чугуне находится в виде шариков [5].

Медные трубы считаются элитными трубами. Минимальный срок службы водопровода, смонтированного из медных

труб, – 70 лет. За время своей эксплуатации медная труба не испортится и никак не изменит своих рабочих качеств. К тому же медь обладает бактерицидными свойствами, и в таких трубах будет течь чистая питьевая вода. Медные трубы не подвержены воздействию ультрафиолетовых лучей, не боятся перепадов атмосферного давления, осадков, не подвергаются коррозии. Медные трубы подходят в качестве основы для системы отопления, а также для организации холодного и горячего водоснабжения.

Следующий вид водопроводных труб – пластиковые трубы. Стойкость к изменяющимся погодным условиям, неподверженность коррозии, долговечность в эксплуатации, простота в монтаже, установке и наладке, небольшая стоимость – эти качества делают пластиковые трубы незаменимыми при оборудовании дома водопроводом. Они почти не теряют тепло при доставке горячей воды, не обрастают отложениями изнутри, безопасны для здоровья.

Полибутиленовые трубы делают из эластичного и теплопроводного материала, который пригоден для транспортировки воды с температурой до +90 °С. Благодаря своей эластичности легко переносят низкие температуры даже при замерзшей внутри воде. Полиэтилен стоек к коррозии. Соединяют такие трубы с помощью сварки. К их недостаткам относят легкую восприимчивость к огню, а также непереносимость бензола.

Полиэтиленовые трубы имеют гладкую поверхность внутри, проходящая по ним вода не оставляет на стенках окиси и отложений примесей. Недостаток в том, что полиэтилен применим только для холодного водоснабжения. При температуре кипения воды и близкой к ней трубы начинают плавиться. Кроме того, данный материал очень чувствителен к ультрафиолетовым лучам. Соединяют полиэтиленовые трубы фитингами и обжимом [3].

Трубы из поливинилхлорида (ПВХ) – самые жесткие из всех представленных на рынке пластиковых труб. Такие трубы практически не горят, мало весят, устойчивы к воздействию солнечных лучей, соединяются друг с другом склеиванием. Недостаток – использование хлора в процессе производства поливинилхлорида, что не добавляет материалу экологичности [3].

Полипропиленовые трубы используют для холодного и горячего водоснабжения, канализации, отопления. По своим техническим показателям они схожи с трубами из сшитого полиэтилена, но дешевле и проще в монтаже. Соединяются между собой сваркой или пайкой, для чего используется паяльник для полипропиленовых труб.

Металлопластиковые трубы соединили в себе положительные свойства металла и пластика. Они подходят для систем водоснабжения и отопления. Такие трубы состоят из трех слоев, между двумя слоями полимера находится тонкий слой металла. Их не нужно спаивать или сваривать, они эластичны, легки, долговечны и эстетичны. В качестве металла внутри трубы чаще всего используют алюминий. Поэтому недопустим его контакт с другими металлами в местах соединения. Основным недостаток таких труб в том, что, если они открыты, их легко повредить, поэтому монтаж труб из металлопластика в стояках централизованного водоснабжения допускается только внутри стен.

3. Надежность водопроводных систем

Теория надежности – наука, изучающая закономерности отказов технических систем [2]. Базовыми понятиями теории надежности является надежность, отказ, работоспособность, долговечность.

Надежность является важнейшим параметром любой технической системы, это свойство позволяет сохранить свои характеристики в определенных пределах при данных условиях эксплуатации. Из этого следует, что надежность определяет такие характеристики системы, как качество, эффективность, безопасность. Отказом называется событие, после возникновения которого характеристики технического объекта выходят за допустимые пределы. Работоспособность – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных нормативно технической документацией. Долговечность – способность объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Критериями надежности называются признаки, по которым оценивается надежность, например вероятность безотказной работы $P(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$, средняя наработка на отказ T . Функция надежности определяется по показательному закону распределения $P(t) = e^{-\lambda t}$ и показывает вероятность безотказной работы за время t . Интенсивность отказов определяется по формуле $\lambda(t) = \frac{1}{T}$. Таким образом, параметр λ характеризует число отказов элемента в единицу времени и имеет размерность (время)⁻¹ [2].

4. Разработка модели аварийности водопроводной сети и определение оптимального плана модернизации

Стоит задача снижения аварийности водопроводной сети за счет постепенной замены старых труб новыми, причем замена осуществляется исходя из ограничений на финансирование, выделяемое на каждый год. Для решения поставленной задачи существует два варианта: снизить суммарную аварийность за рассматриваемый период или снизить аварийность к концу рассматриваемого периода.

Рассмотрим параметры водопроводной сети.

L – протяженность трубопровода, км;

A – аварийность старого трубопровода (количество аварий в год);

$\frac{A}{L}$ – относительная аварийность (число аварий на 1 км протяженности трубопровода).

Рассматриваемый период n лет;

C_1, \dots, C_n – объем средств, выделяемый в 1, ..., n -й год на содержание водопровода, тыс. руб.;

T_1, \dots, T_m – различные виды труб (ВЧШГ, ПЭ, сталь, серый чугун и другие);

s_1, \dots, s_m – затраты на установку соответствующих труб, включающие в себя стоимость приобретения 1 км трубы и стоимость установки 1 км, тыс. руб. на км;

Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами

p_m^n – вероятность безотказной работы трубы T_m возраста n лет, определяется в соответствии с теорией надежности по показательному закону распределения;

x_m^n – количество километров трубы T_m , установленных в n -ом году от начала рассматриваемого периода, км;

k_{cm} – коэффициент старения (отражает увеличение аварийности трубопровода с каждым годом).

Получаем следующую формулу для расчета аварийности в конце рассматриваемого периода:

$$(1) \quad \frac{A}{L}(L - (x_1^1 + x_2^1 + \dots + x_m^1) - \dots - (x_1^n + x_2^n + \dots + x_m^n)) \times \\ \times (1 + n \cdot k_{cm}) + x_1^1(1 - p_1^1) + x_2^1(1 - p_2^1) + \dots + x_m^1(1 - p_m^1) + \\ + \dots + x_1^n(1 - p_1^n) + x_2^n(1 - p_2^n) + \dots + x_m^n(1 - p_m^n) \rightarrow \min.$$

Формула для расчета аварийности за весь рассматриваемый период

$$(2) \quad \frac{A}{L}(L - (x_1^1 + x_2^1 + \dots + x_m^1) - \dots - (x_1^n + x_2^n + \dots + x_m^n)) \times \\ \times (1 + n \cdot k_{cm}) + x_1^1((1 - p_1^1) + (1 - p_1^2) + \dots + (1 - p_1^n)) + \\ + x_2^1((1 - p_2^1) + (1 - p_2^2) + \dots + (1 - p_2^n)) + \dots + \\ + x_m^1((1 - p_m^1) + (1 - p_m^2) + \dots + (1 - p_m^n)) + x_1^2((1 - p_1^1) + \\ + (1 - p_1^2) + \dots + (1 - p_1^{n-1})) + x_2^2((1 - p_2^1) + (1 - p_2^2) + \dots + \\ + (1 - p_2^{n-1})) + x_m^2((1 - p_m^1) + (1 - p_m^2) + \dots + (1 - p_m^{n-1})) + \\ + \dots + x_1^n(1 - p_1^1) + x_2^n(1 - p_2^1) + \dots + x_m^n(1 - p_m^1) \rightarrow \min.$$

Каждый год на замену и установку трубопровода выделяется определенное количество средств, следовательно, минимизация должна осуществляться при выполнении следующих ограничений:

$$\begin{cases} s_1 x_1^1 + s_2 x_2^1 + \dots + s_m x_m^1 \leq C_1, \\ \dots \\ s_1 x_1^n + s_2 x_2^n + \dots + s_m x_m^n \leq C_n. \end{cases}$$

Сформировав модель расчета, мы видим, что перед нами задачи линейного программирования. Решение задач линейного программирования – это достаточно трудоемкий процесс, особенно при большом числе переменных и ограничений. Поэтому решать такие задачи целесообразно с применением ЭВМ. Для решения поставленной задачи был разработан программный продукт, который рассчитывает оптимальный план модернизации водопровода, минимизирующий его аварийность. На рисунке представлен интерфейс разработанного программного продукта.

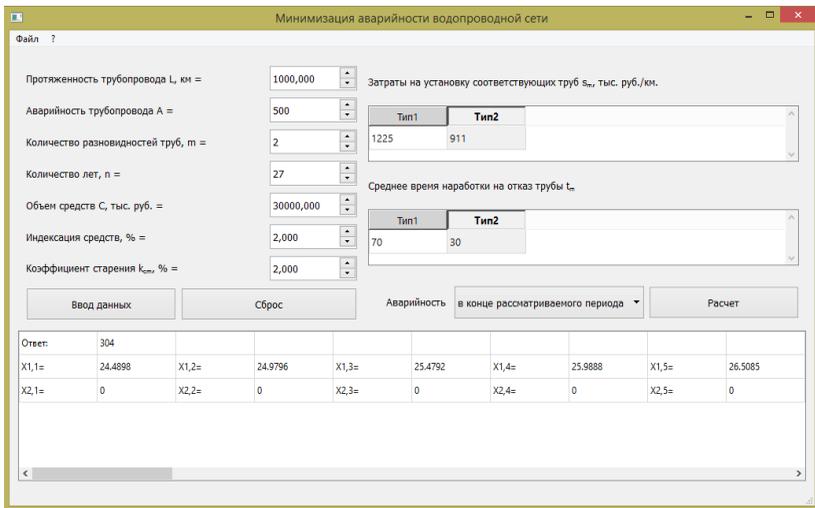


Рис. Интерфейс разработанного программного обеспечения

5. Расчет оптимального плана модернизации водопроводной сети

Для расчета воспользуемся разработанным программным продуктом. Зададим параметры сети и произведём вычисления аварийности в конце рассматриваемого периода.

Протяженность трубопровода: 1000 км.

Аварийность старого трубопровода: 500.

Два вида труб: ВЧШГ и ПЭ.

Среднее время наработки на отказ трубы ВЧШГ: 70 лет.

Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами

Среднее время наработки на отказ трубы ПЭ: 30 лет.

Затраты на установку ВЧШГ: 1 225 тыс. руб на км.

Затраты на установку ПЭ: 911 тыс. руб на км.

Вложения на замену и установку труб (1-й год): 30 000 тыс. руб. Каждый следующий год финансирование увеличивается на 2 %.

Коэффициент старения: 0,02.

Рассматриваемый период: 27 лет.

После расчета программа выдает следующие результаты. Аварийность на двадцать седьмом году $A_{27} = 304$, а значения x_m^n , при которых разработанная модель (1) минимизируется, представлены в таблице.

Обновление водопровода, км

Год	ВЧШГ	ПЭ	Год	ВЧШГ	ПЭ
1	24,4898	0	15	32,3138	0
2	24,9796	0	16	32,96	0
3	25,4792	0	17	33,6192	0
4	25,9888	0	18	34,2916	0
5	26,5085	0	19	0	47,0334
6	27,0387	0	20	0	47,974
7	27,5795	0	21	0	48,9335
8	28,1311	0	22	0	49,9122
9	28,6937	0	23	0	50,9104
10	29,2676	0	24	0	51,9286
11	29,8529	0	25	0	52,9672
12	30,45	0	26	0	54,0265
13	31,059	0	27	0	55,1071
14	31,6802	0	–	–	–

Примечание.

¹ Трубы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

² Полиэтиленовые трубы

Таким образом, мы видим, что в первые восемнадцать лет выгоднее менять трубы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, так как срок эксплуатации больше, чем у поли-

этиленовых труб, а начиная с девятнадцатого года следует менять полиэтиленовые трубы, так как их монтаж дешевле.

Теперь произведем расчет аварийности для всего рассматриваемого периода. Для этого зададим параметры.

Протяженность трубопровода: 1000 км.

Аварийность старого трубопровода: 500.

Два вида труб: ВЧШГ и ПЭ.

Среднее время наработки на отказ трубы ВЧШГ: 80 лет.

Среднее время наработки на отказ трубы ПЭ: 20 лет.

Затраты на установку ВЧШГ: 1 225 тыс.руб на км.

Затраты на установку ПЭ: 911 тыс.руб на км.

Вложения на замену и установку труб (1-й год): 30 000 тыс. руб.

Каждый последующий год – произведение предыдущего на 1,01.

Коэффициент старения: 0,03.

Рассматриваемый период: 27 лет.

На выходе получаем аварийность за двадцать семь лет $A = 4634$, а значения x_m^n , при которых разработанная модель (2) минимизируется, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Обновление водопровода, км

Год	ВЧШГ	ПЭ	Год	ВЧШГ	ПЭ
1	24,4898	0	15	0	37,8532
2	24,7247	0	16	0	38,2317
3	24,982	0	17	0	38,614
4	25,2319	0	18	0	39,0001
5	25,4842	0	19	0	39,3901
6	25,739	0	20	0	39,784
7	25,9964	0	21	0	40,1819
8	26,2564	0	22	0	40,5837
9	26,5189	0	23	0	40,9895
10	26,7841	0	24	0	41,3994
11	27,052	0	25	0	41,8134
12	27,3225	0	26	0	42,2316
13	0	37,1073	27	0	42,6539
14	0	37,4784	–	–	–

Таким образом, при минимизации всего рассматриваемого периода в первые двенадцать лет выгоднее менять трубы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, так как срок эксплуатации больше, чем у полиэтиленовых труб, а начиная с тринадцатого года следует менять полиэтиленовые трубы, так как их монтаж дешевле.

6. Заключение

В данной статье была решена задача построения оптимального плана модернизации водопроводной сети за счет постепенной замены старых труб новыми в условиях ограничений на финансирование, выделяемое каждый год. Для решения поставленной задачи были рассмотрены два варианта: снижение суммарной аварийности за весь рассматриваемый период или снижение аварийности к концу рассматриваемого периода.

Литература

1. ЖУРБА М.Г., СОКОЛОВ Л.И., ГОВОРОВА Ж.М. *Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений*. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: АСВ, 2003. – 288 с.
2. ПОЛОВКО А.М., ГУРОВ С.В. *Основы теории надежности*. – 2-е изд. перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
3. ТАВАСТШЕРНА Р.И. *Изготовление и монтаж технологических трубопроводов: учебник для техникумов*. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 286 с.
4. ТАХА А. ХЕМДИ *Введение в исследование операций*. – 7-е изд.: пер.с англ. – М.: Вильямс, 2005. – 912 с.
5. ТУ1461-037-50254094-2008. *Трубы чугунные напорные высокопрочные*. – введ. 08.12.08. – М., 2008.
6. ФИЛИППОВ В.В. *Технологические трубопроводы и трубопроводная арматура*. – Самара: Изд-во СамГТУ, 2012. – 66 с.

**THE TASK OF MANAGEMENT OF MODERNIZATION
OF WATER-WIRE NETWORK WITH THE PURPOSE
OF MINIMIZATION OF EMERGENCY**

Daria Serkova, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, student
(dasha.serkowa@yandex.ru).

The task of determining the optimal plan of the modernization of the water supply network is considered. The reduction of accident rate is the criteria of optimality. A model for determining the network accident rate for a certain period is constructed, restrictions are made on available financial resources. An example of calculation of the optimal modernization plan is given for two types of used pipes.

Keywords: water supply network, reliability, optimization, modernization.

УДК 004.93'14
ББК 32.813.5

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕТОДА ОБРАБОТКИ ПОТОКА ДАННЫХ С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛАВИАТУРНОГО ПОЧЕРКА

Еременко Ю.И.¹, Олюнина Ю.С.²

*(Старооскольский технологический институт
им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС»,
Старый Оскол)*

Данная статья посвящена вопросу обработки статистических данных, полученных при анализе клавиатурного почерка пользователя информационной системы. Рассмотрены основные характеристики клавиатурного почерка. В статье приведен обзор и сравнительный анализ методов обработки потока данных с целью выявления скрытых зависимостей клавиатурного почерка. Для решения данной задачи предлагается применение как классических статистических методов, например факторного анализа, так и методов искусственного интеллекта – искусственных нейронных сетей и иммунных сетей.

Ключевые слова: клавиатурный почерк, идентификация пользователя, биометрические характеристики, искусственные нейронные сети.

1. Введение

Наиболее активно развивающейся угрозой безопасности информационных систем является угроза утечки данных, которая для современных компаний возрастает пропорционально

¹ Юрий Иванович Еременко, доктор технических наук, профессор (г. Старый Оскол, м-н Макаренко, д.42., (4725) 45-12-10, erem49@mail.ru).

² Юлия Сергеевна Олюнина, аспирантка (julijasergeevna@mail.ru).

интенсивности использования информационных технологий (ИТ). Как показывает статистика [1], большинство угроз корпоративной сети являются именно внутренними, т.е. исходят от сотрудников компании.

Если воздействие внешних угроз можно контролировать с помощью таких аппаратно-технических мер, как защита каналов передачи данных, антивирусная защита внешних WEB-ресурсов организации, контентная фильтрация трафика на наличие вредоносного программного обеспечения (ПО) и т.д., то отследить факты появления внутренних угроз гораздо сложнее. Обеспечение эффективного контроля доступа сотрудников к системе позволит повысить надежность защиты данных корпоративной системы и как следствие сократить финансовые потери [4].

Среди программно-аппаратных средств защиты перспективным направлением является использование динамических биометрических характеристик для идентификации, преимуществами которых являются возможность скрытой идентификации, неотделимость биометрической характеристики от владельца и крайняя сложность подделки.

Для решения данной задачи может быть применена идентификация пользователя по клавиатурному почерку. Однако использование биометрических методов является сложной задачей с точки зрения обработки полученных статистических данных в силу того, что они зависят от психофизиологического состояния человека и могут меняться с возрастом. В связи с этим актуален вопрос выбора метода обработки образцов почерка с целью установления личности их владельца.

2. Постановка задачи

В данной работе рассматриваются основные характеристики клавиатурного почерка как динамической биометрической характеристики, а также производится анализ существующих методов обработки потока данных с целью выявления характеристик клавиатурного почерка. Необходимо определить, какой из методов позволит наиболее эффективно осу-

ществлять идентификацию пользователя по клавиатурному почерку.

3. Характеристики клавиатурного почерка

Идентификация пользователя по клавиатурному почерку является наименее затратным способом, поскольку «не требует установки специальных аппаратных средств, не нуждается в сопровождении, является прозрачным для конечного пользователя, т.е. не причиняет ему неудобств, и позволяет проводить скрытую аутентификацию» [9]. Рассматривая клавиатурный почерк (КП) как биометрическую характеристику, следует отметить его основные параметры: время удержания нажатой клавиши и интервалы времени между нажатиями. Однако на сегодняшний день выделены и другие параметры КП, описанные в работе [9]: общее время набора парольной фразы, частота возникновения ошибок при наборе, факт использования дополнительных клавиш (использование числовой клавиатуры), особенности ввода заглавных букв (использование клавиши Shift или CapsLock) и т.д.

Кроме того, в работе [7] автор рассматривает следующие характеристики КП:

1. Число символов. Чистый размер текста без учета символов, удаленных при помощи BackSpace.
2. Общее время. Считается от момента нажатия первой клавиши до момента нажатия последней.
3. Min пауза. Минимальная пауза между нажатиями.
4. Max пауза. Максимальная пауза между нажатиями.
5. Интервалы между нажатиями клавиш. Средняя пауза между нажатиями.
6. Среднее время удержания. Резкость нажатия. Показывает среднее время между нажатием и отпусканием клавиши.
7. Скорость *spm* – количество набранных символов в минуту.
8. Скорость нетто. Чистая скорость набора текста. Считается для всех неудаленных символов текста.
9. Скорость *wpm* – количество символов в минуту. В англоязычных странах скорость считается именно в этих единицах,

причем длина «слова» всегда равна 5 символам. Иначе говоря, это скорость нетто, деленная на 5.

10. Скорость брутто. Скорость набора с учетом удаленных символов. Позволяет оценить потери скорости в связи с неправильным вводом.

11. Скорость брутто +. Скорость набора с учетом удаленных символов и нажатий BackSpace. Позволяет оценить потери скорости, связанные с неправильным вводом и его исправлением.

12. Скорость брутто *. При расчете этой скорости не учитываются нажатия: ошибочно введенных символов, клавиши BackSpace, а также время, затраченное на эти нажатия. Позволяет оценить скорость при наборе данного текста, если бы ошибок не было вовсе.

13. Потери от исправлений. Показывает в процентном соотношении, на сколько падает скорость из-за времени, потраченного на совершение ошибок и их исправление.

14. Степень аритмичности при наборе. Степень неравномерности набора в процентах. Среднее отклонение паузы между нажатиями от среднего значения. В скобках отображают значение аритмии для участков текста, набранных без ошибок.

15. Число исправлений. Число символов, удаленных при помощи клавиши BackSpace.

16. Процент серий исправлений. Каждая группа подряд удаленных символов считается за одно исправление.

17. Мах без исправлений. Размер максимального фрагмента текста, набранного без исправлений. В скобках обозначают значение в процентах по отношению к общему размеру текста.

18. Число перекрытий между клавишами. Показывает число перекрытий клавиш – кнопка не опущена, но нажата уже другая.

С помощью бесплатного программного обеспечения Typing Statistics авторами были получены параметры набора текста. Графики распределения их значений представлены на рис. 1.

Так же были получены числовые значения данных параметров. Они представлены на рис. 2.



Рис. 1. Графики распределения характеристик КП

Параметр	Значение
Символов	28 (28)
Общее время	2,729с
Средняя пауза	101,076 мс
Среднее время удер...	110,838 мс
Скорость <i>spm</i>	620,45 (599,05)
Скорость <i>wpm</i>	123,12 (118,72)
Скорость нетто	615,60 (593,61)
Скорость брутто*	615,60 (593,61)
Потери от исправле...	0,00%
Аритмия	30,35% (30,35)%
Исправлений	0 (0,00%)
Серий исправлений	0 (0,00%)
max без исправлений	28 (100,00%)

Рис. 2. Числовые значения параметров клавиатурного почерка

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что выбор метода обработки потока данных и выявления скрытых характеристик в нем для идентификации пользователя является сложной многофакторной задачей, требующей тщательного анализа.

4. Анализ методов обработки статистических данных

В силу того что количество характеристик ПК достаточно велико, а в режиме скрытой идентификации пользователь будет вводить символы непрерывно, первоочередной задачей является возможное уменьшение размерности исходной выборки методами уменьшения размерности.

Их использование позволяет:

- ◆ сократить вычислительные затраты при обработке данных;
- ◆ бороться с переобучением;
- ◆ сжимать данные для более эффективного хранения информации;
- ◆ визуализировать данные, проектируя выборку на двух-, трехмерное пространство;
- ◆ извлекать новые признаки.

К способам решения данной задачи относится метод главных компонент – один из наиболее распространенных классических методов, применяемых для обработки больших объемов статистических данных. Идея метода заключается в поиске в исходном пространстве гиперплоскости заданной размерности с последующей проекцией выборки на данную гиперплоскость. При этом выбирается та гиперплоскость, ошибка проецирования данных на которую является минимальной в смысле суммы квадратов отклонений [3].

Однако использование метода главных компонент имеет ряд ограничений. Во-первых, если выборка данных образует скрытую поверхность, которая является нелинейной, метод главных компонент может приводить к неадекватным результатам. Во-вторых, существует возможность определения скрытых компонент только с точностью до аффинного преобразования. В-третьих, существует сложность в определении момента остановки процедуры выделения факторов, так как в процессе последовательного выделения факторов они включают в себя все меньше и меньше изменчивости.

Еще одним возможным способом решения задачи является факторный анализ как методика комплексного и системного изучения и измерения факторов на величину результативных

показателей [6]. Факторный анализ используется с целью сокращения данных, определения структуры взаимосвязей между переменными, т.е. классификации переменных, отбора факторов, определяющих исследуемые результативные показатели, определения формы зависимости между факторами и результативными показателями и ее моделирования.

Однако использование факторного анализа также имеет ряд ограничений, в частности:

- ◆ при использовании факторного анализа исходят из того, что факторы изменяются независимо друг от друга;
- ◆ факторный анализ неизбежно сопровождается потерей исходной информации о связях между переменными. И эта потеря часто весьма ощутима: от 30 до 50 %;
- ◆ ценность представляет решение, когда группы переменных, которые соответствуют разным факторам, незначительно коррелируют друг с другом;
- ◆ не все данные могут быть подвергнуты факторному анализу.

Кроме того, рассматривая статистические методы, следует отметить, что их использование не позволяет в достаточной степени эффективно выявлять зависимости, скрытые в полученных данных.

Для решения данной задачи перспективным является применение методов искусственного интеллекта, так как их важнейшей особенностью является способность решать слабоформализуемые задачи, добиваясь при этом результатов, по эффективности сравнимых с решениями, получаемыми человеком-экспертом. Наиболее подходящими для решения задачи выявления скрытых характеристик клавиатурного почерка являются иммунные системы и нейронные сети.

Иммунные системы обладают важными характеристиками, такими как уникальность, автономность, распределенное обнаружение и устойчивость к шуму, способность к самоорганизации, способность распознавать образы, которые могут быть использованы для различения чужеродных клеток, поступающих в организм от клеток тела, способность к обучению и принятию решений в незнакомой ситуации [2]. Искусственные иммунные

сети используются в области обнаружения аномалий и неисправностей, в системах компьютерной и интернет-безопасности.

Круг задач, решаемых искусственными нейронными сетями, также достаточно широк. В частности, это распознавание и классификация, кластеризация, прогнозирование, идентификация, аппроксимация и интерполяция и т.д.

Применение искусственных нейронных сетей целесообразно в разных областях, и на сегодняшний день существует множество их видов, таких как конкурентные НС, карты Кохонена, АРТ-2 нейронная сеть, сеть Хопфилда, сеть Элмана, вероятностная нейронная сеть.

В работах [5, 8] отмечаются такие преимущества нейронных сетей, как «способность выявлять скрытые закономерности развития ситуации и зависимости между входными и выходными данными, используя способность обучения на множестве примеров», «возможность построения нелинейных зависимостей, возможность применения для широкого круга задач», «способность работать при наличии большого числа неинформативных, шумовых входных сигналов» и т.д.

Таким образом, для решения задачи идентификации пользователя по клавиатурному почерку предложено использовать аппарат искусственных сетей, так как он по сравнению с классическими статистическими методами не использует усредненные значения временных параметров, характеризующих манеру работы пользователя с клавиатурой. Кроме того, по сравнению с другими методами искусственного интеллекта нейронные сети обладают способностью выявлять скрытые закономерности зависимости в потоке данных, обучаться на множестве примеров, работать при сильном зашумлении входных сигналов, обеспечивать более высокое быстродействие за счет распараллеливания процесса обработки данных и т.д.

5. Заключение

Идентификация пользователя по клавиатурному почерку позволит осуществлять контроль доступа к системе в непрерывном скрытом режиме без использования дополнительных аппаратных

средств. Задачу обработки статистических данных, полученных в результате анализа КП, предложено решать с помощью аппарата искусственных нейронных сетей, которые позволяют выявлять скрытые зависимости и зависимости во входных данных, а также способны обучаться на множестве примеров.

Литература

1. *Аналитический центр InfoWatch* [Электронный ресурс]. – URL: www.infowatch.ru/analytics/ (дата обращения: 16.04.2016).
2. БРЮХОВЕЦКИЙ А.А., СКАТКОВ А.В. *Применение моделей искусственных иммунных систем для решения задач многомерной оптимизации* // Оптимізація виробничих процесів. – 2010. – № 7. – С. 119–122.
3. ВЕТРОВ Д.П., КРОПОТОВ Д.А., ОСОКИН А.А. *Автоматическое определение количества компонент в EM-алгоритме восстановления смеси нормальных распределений* // Вычисл. мат. и мат. физ. – 2010. – Т. 50, № 4. – С. 1–14.
4. ЕРЕМЕНКО Ю.И., ОЛЮНИНА Ю.С. *Идентификация пользователя по его клавиатурному почерку* // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы XII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием / СТИ НИТУ «МИСиС». – Старый Оскол, 2015. – С. 147–151.
5. КОСТЮЧЕНКО Е.Ю. *Идентификация непрерывных биометрических сигналов на основе нейронных сетей*: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Томск, 2010. – 24 с.
6. ТАКАХАСИ С. *Факторный анализ*. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 146 с.
7. ТУШКАНОВ Е.В. *Разработка методов и алгоритмов повышения защищенности информации на основе анализа клавиатурного почерка*: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19 / С.-Петерб. нац. исслед. ун-т информ. технологий, механики и оптики. – СПб., 2016. – 19 с.
8. ХАЙКИН С. *Нейронные сети: полный курс*. – 2-е изд.: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

9. ШАРИПОВ Р.Р. *Разработка полигауссового алгоритма аутентификации пользователей в телекоммуникационных системах и сетях по клавиатурному почерку*: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. – Казань, 2006. – 135 с.

ON METHOD SEARCH TO PROCESS DATA TO IDENTIFY HIDDEN CHARACTERISTICS OF KEYSTROKE PATTERN

Yuri Eremenko, Sary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Sary Oskol, D.Sc, professor (Sary Oskol, Makarenko microdistrict, 42, (4725)45-12-10, erem49@mail.ru).

Julia Olynina, Sary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Sary Oskol, postgraduate (julijasergeevna@mail.ru).

Abstract: This article scope is to process statistical data obtained by analyzing the information system user keystroke pattern. The main characteristics of the keystroke pattern are considered. The research gives an overview and comparative analysis of data flow processing methods if the purpose is to reveal hidden dependencies of the keystroke pattern. Solving this problem, it is proposed to use both classical statistical methods, for example, factor analysis, and such artificial intelligence methods as artificial neural networks and immune networks.

Keywords: keystroke pattern, user authentication, biometrics, artificial neural networks.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПА МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОСТИ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

Цуканов М.А.¹

*(Старооскольский технологический институт
им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС», Старый Оскол)*

В статье рассматривается проблема технологической координации и оперативного управления сложноструктурированной дискретно-непрерывной производственной системой. Рассматриваются алгоритмы решения отдельных подзадач в рамках мультиагентной системы, принцип работы которой основан на декомпозиции задачи технологической координации и оперативного управления. Отмечается необходимость использования принципа многоальтернативности для повышения эффективности принятия решений по вопросам оперативного управления и технологической координации.

Ключевые слова: оперативное управление, технологическая координация, многоальтернативность, мультиагентные технологии.

1. Введение

Для дискретно-непрерывного класса производственных систем характерна раздельная обработка этапов заказа на отдельных технологических агрегатах. Таким образом, система оперативного управления ими характеризуется как распределенная организационно-техническая система.

Главной задачей систем оперативного управления и технологической координации (ОУ и ТК) таких систем является составление согласованных планов цехов предприятия и обеспе-

¹ Михаил Александрович Цуканов, кандидат технических наук, старший преподаватель (tsukanov_m_a@mail.ru).

чение их выполнения. Значительный объем информации, которую необходимо обрабатывать оперативно-диспетчерскому персоналу в процессе производственного планирования, сложность решаемых задач в условиях необходимости учета большого числа взаимосвязанных факторов и высокой динамики производства диктуют необходимость разработки системы поддержки принятия (СППР) по ОУ и ТК сложноструктурируемых дискретно-непрерывных производств.

Мировая практика сегодня для совершенствования алгоритмов управления в таких системах предлагает использование мультиагентных технологий [1].

2. Декомпозиция задачи ОУ и ТК

Задача ОУ и ТК сложного производства в режиме он-лайн не имеет простого решения. Большинство исследований в этом направлении предлагают декомпозицию исходной задачи координации на ряд взаимосвязанных подзадач с последующей интеграцией получаемых решений (рис. 1).

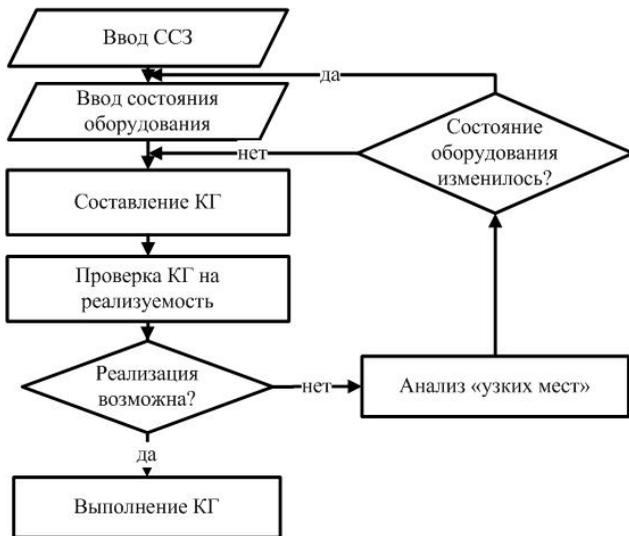


Рис. 1. Информационно-функциональная схема ОУ и ТК сложного производства

Концептуальный подход к решению задачи ОУ и ТК сложного производства предполагает:

- построение оптимального производственного расписания с учетом фактических ограничений производства.
- проверку производственного расписания на реализуемость в зависимости от текущего состояния производства.
- анализ «узких мест» составленного производственного расписания и формирование рекомендаций по их устранению.

3. Мультиагентная система оперативного управления и технологической координации

3.1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ

С целью повышения эффективности принятия решений по ОУ и ТК предлагается СППР на основе мультиагентных технологий (МАТ), которая базируется на комплексе моделей и алгоритмов оптимизации производственных планов в режиме on-line (рис. 2).

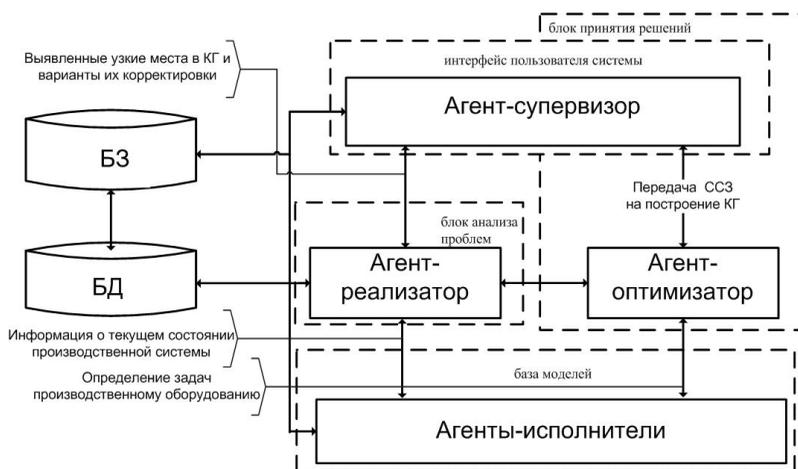


Рис. 2. Структура МАС ОУ и ТК

Блок принятия решений концептуальной схемы мультиагентной системы (МАС) представлен агентом-оптимизатором и агентом-супервизором, блок анализа проблем – агентом-реа-

лизатором, имитационная модель производства – агентами-исполнителями.

Агент-супервизор – интерфейсный агент, решающий задачу взаимодействия агентов МАС и связи с пользователем. Он выдает плановое расписание, отчет по анализу «узких мест» и варианты их корректировки, формирует задания нижестоящим агентам МАС на обработку производственных заказов в соответствии с принятым к реализации расписанием. Агент-оптимизатор – гибридный агент, в задачу которого входит построение оптимального расписания на основе правил и ограничений производства. Агент-реализатор – гибридный агент, который осуществляет проверку сформированного расписания на реализуемость.

Агент-исполнитель – партнерский агент, задачей которого является слежение за работой конкретного технологического агрегата, входящего в реализуемый технологический маршрут.

3.3. ПРИНЦИП МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО АГЕНТА

Как правило, структура и алгоритм принятия решений каждого агента определяется проектировщиком на начальном этапе проектирования системы. Этому предшествует анализ различных методов, которые могут быть положены в основу функционирования агентов. В итоге из этого набора выбирается один конкретный метод или алгоритм на основании демонстрации им лучшего или оптимального результата по сравнению с другими.

В случае если рассматриваемые подходы и методы тестировались на реальных производственных данных за определенный временной промежуток, нет гарантии сохранения оптимального результата в ходе реализации алгоритма в ходе технологического процесса в целом.

Для компенсации недостатка такого рода предлагается рассмотреть многоальтернативную структуру агента (рис. 3).

Основные принципы многоальтернативности рассмотрены в работе [2]. При такой реализации агента в конкретный момент времени для принятия решения могут быть использованы альтернативные подходы. Механизм управления агента выбирает алгоритм работы в зависимости от текущего состояния производственной системы.

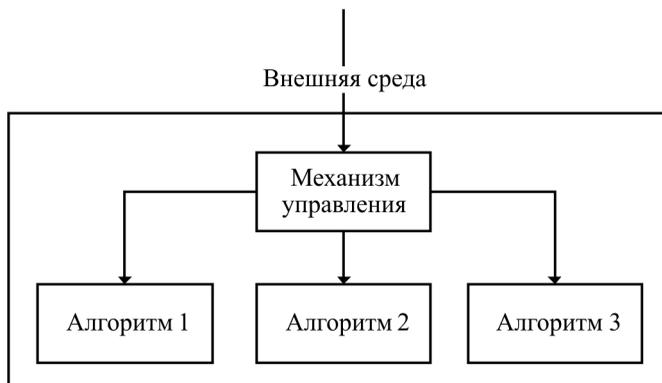


Рис. 3. Структура многоальтернативного агента

Актуальной задачей для агентов такого рода является разработка системы правил для выбора алгоритма в зависимости от текущей производственной ситуации. В качестве таких ситуаций в системе ОУ и ТК производства могут выступать смена режима объекта управления с ручного на автоматический и необходимость корректировки исполняемого расписания в реальном времени.

Рассматривая структуру МАС ОУ и ТК, целесообразно рассмотреть многоальтернативные реализации агентов-исполнителей и агента-оптимизатора.

В процессе решения задачи мониторинга состояния производственных агрегатов агентами-исполнителями предлагается рассмотреть две альтернативные методики в зависимости от режима управления этими объектами. В случае автоматического характера управления предлагается рассматривать агрегативный подход Бусленко [4], а в случае ручного или полуавтоматического – нечеткую логическую модель [5].

Для составления реализуемого расписания агентом-оптимизатором целесообразно использовать иммунный алгоритм клональной селекции [3]. Но при его корректировке стоит рассмотреть альтернативные варианты. Перспективным инструментом для решения такой задачи представляется адаптация фрактальных вычислений, например фрактала Кантора.

4. Заключение

Такой подход к реализации системы ОУ и ТК позволит повысить качество составления производственных расписаний, эффективно выявлять нарушения в ходе реализации производственной программы, определять источник нарушения и реализовать корректировку расписания, что в итоге позволит сократить производственные издержки.

Литература

1. БОДЯНСКИЙ Е.В., КУЧЕРЕНКО В.Е., КУЧЕРЕНКО Е.И. *Гибридные нейро-фаззи-модели и мультиагентные технологии в сложных системах.* – Днепропетровск: Системные технологии, 2008. – 357 с.
2. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Многоальтернативные системы: обзор и классификация* // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 4–13.
3. ЦУКАНОВ М.А., БОЕВА Л.М. *Построение контактного графика сложноструктурированного дискретно-непрерывного производства с использованием иммунного алгоритма* // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 66–70.
4. ЦУКАНОВ М.А., БОЕВА Л.М. *Сталеплавильное производство как агрегативная система* // Управление большими системами: тр. VI школы-семинара молодых ученых. – 2009. – С. 5311–136.
5. ЦУКАНОВ М.А. *Нечеткая модель как основа технологической координации производства* // Теория активных систем: материалы междунар. науч.-практ. конф. – 2014. – С. 187–188.

USING OF THE MULTI-ALTERNATIVE PRINCIPLE IN MULTIAGENT SYSTEMS

Tsukanov Mikhail, Oskol Institute of Technology branch of the “National University of Science and Technology “MISiS”, Stary Oskol, Cand.Sc., Senior Lecturer (tsukanov_m_a@mail.ru).

Abstract: The article deals with the technological coordination and operational control problem of a complex-structured discrete-continuous manufacture system. Algorithms for solving individual sub-tasks within the framework of a multi-agent system are considered, the principle of which is based on the technological coordination and operational control task decomposition. There is a need to use the multi-alternativity principle to improve the decision-making efficiency on issues of operational control and technological coordination.

Keywords: operational control, technological coordination, multi-alternativity, multi-agent systems.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСПИСАНИЯ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛА КАНТОРА

Цуканов М.А.¹, Божкова О.А.²
(НИТУ «МИСиС», Старый Оскол)

В статье рассмотрена проблема оперативного управления и технологической координации в металлургической отрасли. Сталеплавильное производство отличается сложной системой связей, представляющей трудности для планирования деятельности предприятия. В рамках оперативного управления производства была выделена подзадача диспетчирования производства, мониторинга нарушения плана и создания корректирующих действий относительно запланированного состояния. Для эффективного решения задачи авторами предлагается подход на основе мультиагентных технологий. В качестве механизма межагентного взаимодействия используются элементы теории детерминированного хаоса. Предполагается, что разработанный метод межагентного взаимодействия позволит решить задачу оптимизации средств и методов моделирования сложной структуры производственных потоков с целью анализа их применимости для моделирования структуры их производств хаоса для увеличения роста производственных показателей.

Ключевые слова: мультиагентные технологии, оперативное управление, технологическая координация, фракталы.

¹ Михаил Александрович Цуканов, кандидат технических наук, старший преподаватель (tsukanov_m_a@mail.ru).

² Олеся Александровна Божкова, магистрант (lesyabozhkova@yandex.ru).

1. Введение

Эффективность технологической координации определяется алгоритмами устранения различного рода рассогласований и отклонений в ходе производства от установленной производственной программы и принятия мер по координации производственного процесса в зависимости от сложившейся организационно-технологической ситуации.

Задача технологической координации в системе управления существенно усложняется для многономенклатурных производств, характеризующихся многообразием оборудования, многовариантностью и параллельным выполнением технологических маршрутов и как следствие сложными перекрестными материально-транспортными связями. Задачу технологической координации усложняет совмещение в рамках одного производства непрерывных и дискретных технологических процессов.

Примерами таких производств являются металлургическое, пищевое, фармакологическое, химическое производства, а также сетевые производственные системы.

2. Проблемы моделирования сложноструктурированного производства

2.1. ТРУДНОСТИ ЗАДАЧ ОУ И ТК

Трудность задачи ОУ и ТК сложноструктурированных производств обусловлена перекрестными схемами транспортно-технологических потоков, многовариантностью технологических маршрутов (рис. 1), с одной стороны, и дискретно-непрерывным характером производства – с другой. В работах П.И. Литвинцева, С.А. Коновалова, В.В. Зимина, Б.Б. Крейсмана рекомендуется использовать декомпозицию исходной задачи координации на ряд взаимосвязанных подзадач с последующей интеграцией и сопряжением получаемых решений.

2.2. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Существует множество решений проблемы моделирования производства, основанных на комбинаторных и эвристических методах оптимизации, методах имитационного моделирования.

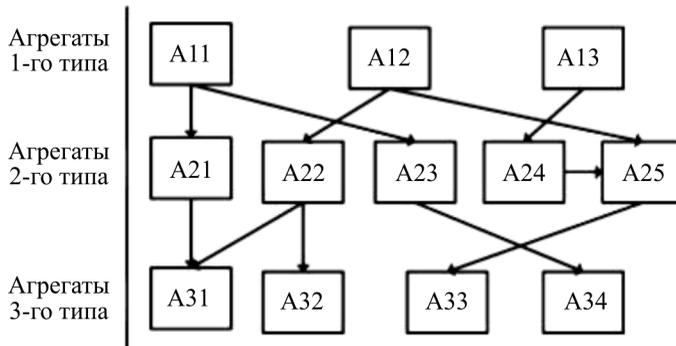


Рис. 1. Структура связей сложноструктурированного производства

Использование данных механизмов для задачи корректировки расписания позволяет определить характер необходимой корректировки – структурная (перестроение всего расписания) или параметрическая (изменение следования ряда агрегатов).

Однако реализация корректировки в режиме реального времени не представляется возможной из-за комбинаторной природы этих методов. Для решения задачи ОУ и ТК существует возможность использования мультиагентных систем. В работе [3] наглядно представлены модели и алгоритмы оптимизации оперативного планирования с использованием имитационного моделирования и методов искусственного интеллекта. Авторы обосновали целесообразность и перспективность разработки СППР оперативного управления и технологической координации сложноструктурированных распределенных производственных систем на основе мультиагентных технологий. Также одним из примеров является работа [2]. Разработанная МАС технологической координации в системе управления для ЭСПЦ АО «ОЭМК» позволила выявить рост экономической эффективности производства за счет повышения степени координации производственного оборудования при использовании разработанных алгоритмов.

Представленный иммунный алгоритм является эффективным и позволяет быстро составить расписание, проверка диспетчиро-

вания осуществляется с помощью сетей Петри. Механизм позволяет определить рассогласование между плановым и фактическим состоянием производства и определить характер корректировки исполняемого расписания.

3. Составление и корректировка производственного расписания с использованием фракталов Кантора

3.1. ОПИСАНИЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАРАКТЕРА СИСТЕМЫ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Одной из главных функций оперативного управления является планирование. Оперативное планирование конкретизирует и обеспечивает выполнение заданий, установленных текущим планом. При этом уточняются объем и номенклатура продукции, подлежащей изготовлению в заданный период. Для каждого цеха и его подразделений устанавливаются месячные и декадные графики, производственные программы.

Для моделирования пространственно-временных производственных процессов наиболее подходящей является модель «расписание», которая представляет собой перечень работ, выполняемых в конкретный период по всем объектам производства в подразделении.

Сталеплавильный процесс представляет собой сложную систему взаимосвязей металлургических агрегатов, в ходе которого выделяется или поглощается теплота, достигается или нарушается равновесие протекающих реакций, происходят другие энергетические процессы.

Схема производства позволяет заметить наличие периодического процесса с воспроизводящейся траекторией. После того как система вновь переходит в начальное состояние, процесс повторяется по той же траектории. Следовательно, по параметрам одного из периодов повторения траектории возможно прогнозировать будущее.

Кроме того, система производства является нелинейной и неустойчивой. Представлены сложные траектории, на больших временах система отличается непредсказуемостью поведения (зависимость от начальных условий). Следует отметить,

что, нерегулярность происходит из самой системы, а не от внешних факторов (шум, флуктуации). Именно так характеризуется детерминированный хаос.

Для решения существующих проблем необходимо разработать альтернативный вариант иммунному алгоритму межагентного взаимодействия на основе детерминированного хаоса, который позволит на этапе корректировки компенсировать недетерминированные события на основе фрактализации.

Кроме того, решение задачи должно обеспечить: минимизацию суммарного времени простоев всех технологических агрегатов, минимизацию пути перемещения кранов (а значит, и времени совершения кранами подъемно-транспортных операций по обслуживанию технологических агрегатов, а также затрат электроэнергии на их осуществление).

3.2. АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ И КОРРЕКТИРОВКИ РАСПИСАНИЯ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛОВ КАНТОРА

В рамках рассматриваемой задачи был разработан алгоритм формирования и корректировки расписания, который реализует принцип компенсации элементов детерминированного хаоса в системе производства в процессе оперативного управления [1].

Для рассматриваемого класса производств характерна раздельная обработка этапов заказа на отдельных технологических агрегатах, таким образом, система оперативного управления характеризуется как распределенная организационно-техническая система. Современная мировая практика совершенствования управления в таких системах предлагает использование мультиагентных технологий. Этот алгоритм является основным инструментом работы агента-оптимизатора.

На первом этапе алгоритм предлагает выборку из системы перечня заданий на транспортировку грузов за смену. Каждому конкретному заданию соответствует определенный технологический маршрут с указанным временем начала и окончания всех операций. Согласно правилу составления фрактала Кантора (рис. 2) все задания разбиваются на три группы. Каждая такая группа содержит $1/3$ часть всех заказов смены. На следующем этапе проверяется общая длительность всех трех разбиений на

соответствие времени сменно-суточного интервала. Если время работы превышает сменно-суточную норму, то необходимо детализировать каждый из рассматриваемых интервалов еще на три части и повторить процедуру проверки до тех пор, пока не будет построен оптимальный фрактал.

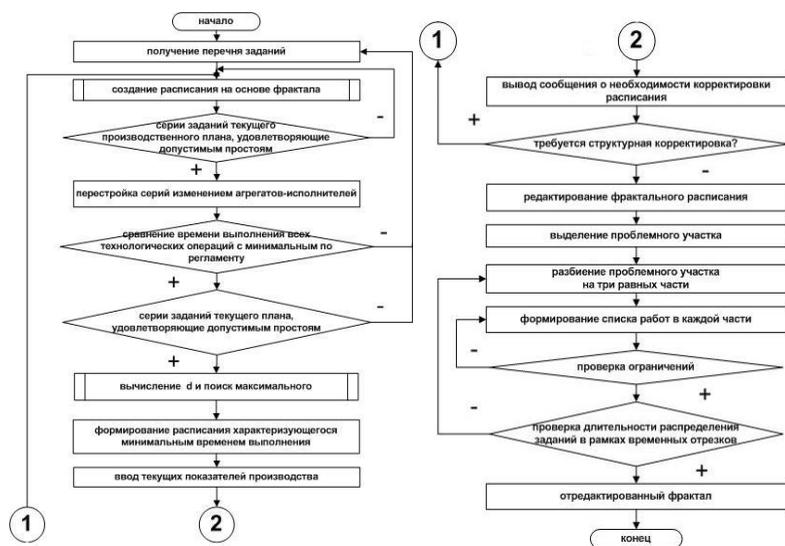


Рис. 2. Алгоритм формирования и корректировки расписания на основе фракталов Кантора

Далее проверяется ограничение простоев. В реальных условиях возможны несоответствия, которые влияют на ход производства и выполнения плана, в частности на простои. Это поломки оборудования, нарушение нормального протекания технологических процессов, аварии технологических и подъемно-транспортных агрегатов, срывы в поставке сырья, сбои в подаче электроэнергии и энергоносителей, авторитарные решения руководства.

Если серии заказов текущего плана удовлетворяют простоям, то происходит переход к следующему этапу. Пыль Кантора имеет размерность d . Для максимального использования транспорта необходимо, чтобы выполнялось соотношение $di \rightarrow 1$. Однако на

практике такое редко наблюдается. С учетом принципов фрактального моделирования и эргономики необходимо определить компромисс, так называемое «золотое сечение», путем экспериментальных методов. Затем формируется расписание, характеризующееся минимальным временем выполнения, и ввод текущих показателей производства.

Если фактические данные не совпадают с планами, предполагается вывод сообщения о необходимости корректировки расписания. При значительных отклонениях в ходе производственного процесса требуется вносить коррективы в поведение системы в целом и отдельных её элементов. Для этого производится корректировка плана. В зависимости от степени рассогласованности хода производства может понадобиться параметрическая, структурно-параметрическая или полная корректировка расписания. Параметрическая коррекция подразумевает частичную перестройку расписания, т.е. изменение производственного расписания по времени выполнения отдельных технологических операций. При структурно-параметрической корректировке происходит изменение структуры и полная перестройка производственного расписания, т.е. его формирование вновь.

Причинами таких корректировок могут служить внеплановые заказы, нарушение технологии, отключение подачи электроэнергии и другие, в том числе субъективные причины. Результаты проверки реализуемости расписания выводятся в виде сообщения о необходимости корректировки расписания [1].

Если не требуется структурная корректировка, то на следующем этапе происходит частичное редактирование фрактального расписания. Для этого выделяется проблемный участок и разбивается на три равных части. В каждой из них формируется список работ. Затем каждая часть проверяется на соответствие длительности распределения заданий и ограничения. К таким ограничениям относят отклонение фактического времени выполнения операции с учетом текущей производственной ситуации на конкретном этапе обслуживания заказа от нормативного.

Стоит отметить, что причиной нарастающей рассогласованности планового расписания и фактического графика работы производства может быть переназначение номенклатуры произ-

водимой продукции, отклонение фактических производственных показателей от заданных, изменение состава и параметров плановых простоев оборудования с учетом текущего состояния организационно-технологической системы, изменение ограничений материально-технического характера, изменение ритмичности поставки материалов и отгрузки готовой продукции, изменение состава оборудования.

В результате выполнения алгоритма получаем отредактированный фрактал, который представляет собой расписание с учетом удовлетворения всех ограничений в текущей производственной ситуации.

4. Заключение

Представленный алгоритм создания и корректировки расписания на основе фрактала Кантора позволит решить подзадачу диспетчирования производства, мониторинга нарушения плана и создания корректирующих действий относительно запланированного состояния. Эффектом от предлагаемой разработки станет сокращение временных издержек при структурной корректировке на построение нового производственного расписания.

Литература

1. БОЖКОВА О.А. *Построение и корректировка производственного расписания* // Четырнадцатая Всерос. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов: сб. науч. и науч.-практ. докл. / НИТУ «МИСиС». – Старый Оскол, 2017. – С. 598–601.
2. ЦУКАНОВ М.А. *Технологическая координация и управление сложноструктурированными производствами на основе мультиагентных технологий*: дис. ... канд. техн. наук. – Старый Оскол, 2012. – 169 с.
3. ЦУКАНОВ М.А., БОЕВА Л.М. *Мультиагентная система поддержки принятия решений по оперативному планированию и технологической координации сложноструктурированных производственных систем* // Управление большими системами: сб. тр. – 2012. – №. 39. – С. 254–263.

ALGORITHM DESIGN COMPILING MANUFACTORY SCHEDULE BASED ON FRACTAL CANTOR

Mikhail Tsukanov, Sary Oskol technological institute n.a. A.A. Ugarov (branch) National University of Science and Technology "MISiS", Sary Oskol, Russia, Cand.Sc., senior lector (*tsukanov_m_a@mail.ru*).

Olesya Bozhkova, Sary Oskol technological institute n.a. A.A. Ugarov (branch) National University of Science and Technology "MISiS", Sary Oskol, Russia, magistrand (*lesyabozhkova@yandex.ru*).

Abstract: Article discuss the problem of operational control and technological coordination in the metallurgical industry. Steelmaking has a complex system of connections, presents difficulties for business planning. As part of the operational control of the production has been allocated sub-task scheduling production, monitoring violations of the plan and the establishment of corrective action with respect to the planned state. To effectively solve the problem the authors propose an approach based on multi-agent technology. Elements of deterministic chaos theory uses as inter-agent communication action. It is assumed that the method inter-agent communication will allow to solve the optimization problem of means and methods of modeling the complex structure of production flows in order to analyze their applicability for modeling the structure of their industries chaos to increase growth performance.

Keywords: multiagent technologies, operative control, technologic coordination, fractal.

УДК 681.51 + 622.73
ББК 32.966

О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

**Еременко Ю.И.¹, Полеценко Д.А.²,
Цыганков Ю.А.³, Боровинских М.Д.⁴**

*(Старооскольский технологический институт
им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС», Старый Оскол)*

В данной работе разработана математическая модель шаровой мельницы. Актуальность работы обусловлена отсутствием универсального механизма контроля состояния агрегата. Наиболее перспективным направлением является построение модели, которая позволит учесть многофакторный характер объекта и нелинейность взаимосвязи переменных, характеризующих процесс помола. Все это обеспечит возможность построения системы управления на основе измеряемых в данный момент технологических показателей. Для реализации данного подхода был использован регрессионный анализ с применением полиномов различного типа. Также были проведены исследования по применению аппарата нейронных сетей для решения данной задачи.

Ключевые слова: шаровая мельница, математическая модель, регрессионный анализ, нейронная сеть, MatLab.

¹ Юрий Иванович Еременко, доктор технических наук, профессор (erem49@mail.ru).

² Дмитрий Александрович Полеценко, кандидат технических наук, доцент (po-dima@yandex.ru).

³ Юрий Александрович Цыганков, аспирант (TsY-18@yandex.ru).

⁴ Максим Дмитриевич Боровинских, студент (bruh1100@gmail.com).

1. Введение

В настоящее время на горно-добывающих предприятиях крайне актуален вопрос энергоэффективности работы промышленных объектов, причем особое внимание уделяется тем агрегатам, которые имеют значительные показатели энергопотребления ввиду высокой мощности. К объектам подобного типа относится и шаровая мельница, осуществляющая помол руды на стадии измельчения в замкнутом цикле с двухспиральным классификатором [1]. Мельница перерабатывает весь поток измельчаемого материала, при этом на процесс помола расходуется более 50 % энергии, потребляемой обогатительной фабрикой. А ввиду широкого использования мельниц в различных областях промышленности около 3–4 % всей мировой электроэнергии расходуется на стадиях измельчения [9].

Учитывая названные причины, можно сказать, что задача разработки системы, позволяющей осуществлять управление шаровой мельницей в наиболее энергоэффективном режиме при соблюдении качества выходного продукта, достаточно актуальна для предприятий.

2. Разработка модели шаровой мельницы

Основной проблемой при попытках разработки подобной системы является необходимость построения математической модели мельницы. Данный процесс затруднен многопараметрическим характером объекта, выражающимся во влиянии нескольких входных воздействий на выходной параметр, а также во взаимной корреляции входных воздействий [3, 4]. Поэтому необходимо разработать модель мельницы, которая позволит осуществлять управление объектом с учетом переменных, учитывать изменение состояния объекта и на основе имеющихся данных прогнозировать изменение значения выхода при различных характеристиках входного материала [6, 7].

2.1. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ

В настоящее время существует ряд методов построения математических моделей технологических объектов. Наиболее

распространенным методом разработки моделей на основе данных его промышленной эксплуатации является регрессионный анализ (РА), позволяющий аппроксимировать график технологического процесса при помощи определенной функциональной зависимости [8]. В качестве данных нами использовались сведения о существующей системе автоматизации предприятия. Изначально данные предварительно были отфильтрованы и подвергнуты нормировке для исключения ошибочных результатов измерений.

Для реализации в MatLab нами была разработана математическая модель по схеме, представленной на рис. 1, где в качестве выходного сигнала использовались значения тока спирали классификатора как косвенный параметр состояния объекта, на который ориентируется оператор мельницы. В качестве входов были выбраны значения объема подаваемой руды, объемы подачи воды в мельницу и бутару мельницы [5].

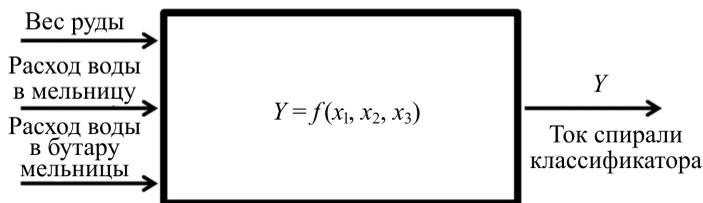


Рис. 1. Схема математической модели шаровой мельницы

Для выбора функции регрессии нами были проведены опыты, в которых использовались линейная, квадратичная функции и степенные зависимости до 5-го порядка включительно, экспоненциальная и дробная функции. Качество моделирования оценивалось на основе таких численных показателей, как функционал МНК и коэффициентов корреляции реального и моделируемого графиков тока.

Наилучший результат был получен при использовании полинома Колмогорова–Габора, используемого при описании нелинейных объектов [2]. Общий вид полинома представлен в формуле.

$$(1) \quad Y(x_1 \dots x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n b_{ijk} x_i x_j x_k,$$

где Y – значение выходного параметра объекта; $x [1..n]$ – входные воздействия; n – количество входных параметров; b_{ijk} – коэффициенты полинома.

После получения коэффициентов регрессии была реализована модель в MatLab, окончательный вид которой представлен на рис. 2. С целью придания динамических свойств модели в каналы входных переменных были добавлены аperiодические звенья. Идентификация параметров звеньев была произведена также на основе имеющихся данных.

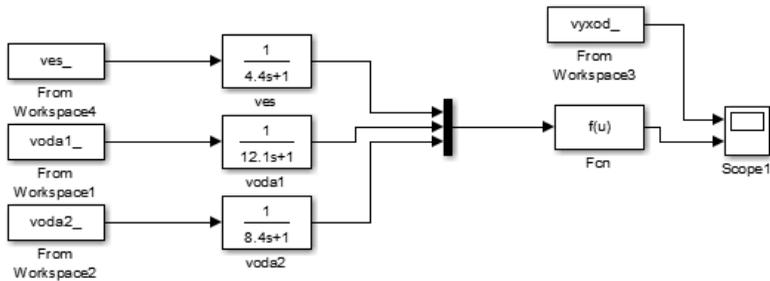


Рис. 2. Математическая модель шаровой мельницы, реализованная в среде MatLab

Стоит оговориться, что для нахождения коэффициентов регрессии использовалась выборка объемом 4500 точек, а для тестирования модели на ее вход подавалась выборка данных объемом 500 точек. После проведения симуляции работы модели на основе полинома Колмогорова–Габора были получены графики работы данной модели, представленные на рис. 3, где жирной линией обозначен реальный график тока, а пунктиром – выходной сигнал модели.

Из графика работы модели видно, что, несмотря на повторение общего характера, модельный график тока не дает достаточной точности при работе на тестовой выборке.

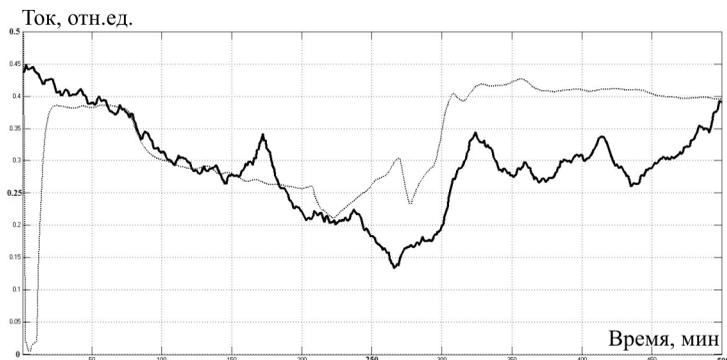


Рис. 3. Результат работы модели на основе полинома Колмогорова–Габора

2.2. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

После проведения экспериментов на основе регрессионного анализа и получения результатов не слишком высокой точности было принято решение о разработке математической модели шаровой мельницы с использованием аппарата нейронных сетей (НС), которые, обладая способностью выявлять скрытые и аппроксимировать нелинейные зависимости за счет нелинейных функций активации в слоях, предположительно должны повысить качество моделирования.

Для моделирования использовались многослойные сети прямого распространения сигнала. Типовая структура, адаптированная для решения данной задачи, представлена на рис. 4.

С целью выявления архитектуры нейронной сети, которая позволит получить наиболее качественный результат, были проведены эксперименты с изменением количества нейронов в слоях, использованы различные функции активации. Первоначально положительный результат был получен при использовании НС с двумя скрытыми слоями с 60 и 30 нейронами соответственно. После достижения высоких показателей качества при обучении на вход нейронной сети была подана тестовая выборка. В результате выход модели повторял сигнал тока, однако имели место колебания, снижающие качество моделирования.

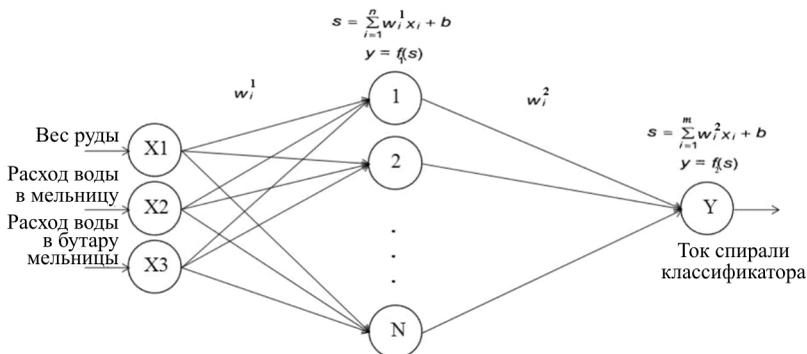


Рис. 4. Типовая архитектура многослойной нейронной сети

Поэтому было принято решение об усложнении структуры НС. Опыты с НС с тремя скрытыми слоями показали, что наиболее качественный результат получается при использовании структуры с 55, 50 и 45 нейронами соответственно и функциями активации – гиперболический тангенс, сигмоидная функция во 2-м и 3-м скрытом слое, а также с линейной функцией активации в выходном слое. Результат работы данной НС на тестовой выборке представлен на рис. 5. Здесь и далее реальный график тока показан жирной линией, а выходной сигнал модели – пунктирной.

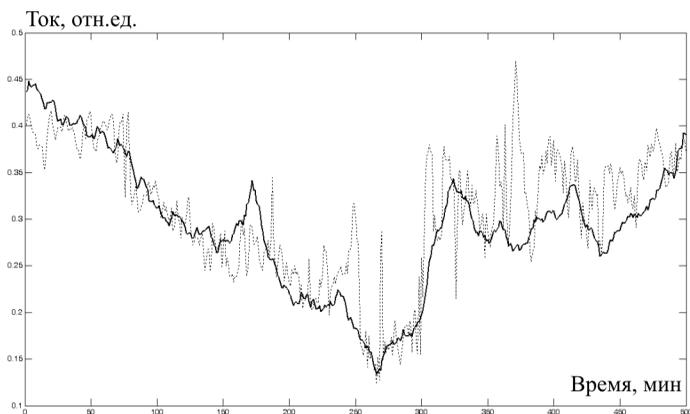


Рис. 5. График работы нейронной сети с тремя скрытыми слоями

Дальнейшее усложнение структуры НС существенного повышения качества моделирования не принесло. Но стоит отметить, что в некоторые моменты времени на выходе модели заметны существенные по амплитуде колебания, которые могут отразиться на работе системы при ее промышленной эксплуатации.

Поэтому коллективом авторов для повышения качества моделирования посредством учета динамики объекта было принято решение об изменении структуры НС внесением дополнительных нейронов во входной слой. Дополнительные нейроны предназначены для обработки информации, представляющей собой все те же входные сигналы, однако с дискретной задержкой на один и более тактов. Внесение задержки по каналам подачи руды и воды в мельницу на один такт позволило получить гораздо менее зашумленный колебаниями сигнал выхода модели. Причем было замечено, что он достигается при использовании НС с меньшим количеством нейронов, что является положительным моментом, поскольку позволяет использовать меньший объем вычислительных ресурсов системы. Результат работы НС с сигналами, задержанными на один такт, и тремя скрытыми слоями по 50, 35 и 25 нейронов соответственно представлен на рис. 6.

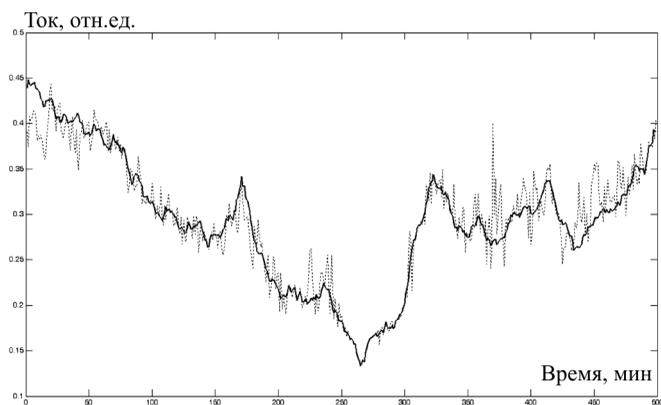


Рис. 6. График работы нейронной сети с тремя скрытыми слоями и дискретной задержкой входных сигналов на 1 такт

Постепенное повышение количества дискретных задержек до 3 последовательно приводило к повышению качества моделирования.

Затем последовательно были проведены эксперименты по добавлению нейронов, обрабатывающих сигнал тока, задержанный на 1, 2 и 3 такта. Посредством этого были получены результаты, представленные на рис. 7, где показано моделирование работы шаровой мельницы при помощи НС с тремя скрытыми слоями и 50, 35 и 25 нейронами в них, с функциями активации – гиперболический тангенс, сигмоидная функция во 2-м и 3-м скрытом слое, а также линейная функция активации в выходном слое. Во входном слое использованы 15 нейронов – объем подачи руды в мельницу, объем подачи воды в мельницу и бутару мельницы, данные сигналы, задержанные на 1, 2 и 3 такта, а также сигнал тока, задержанный на 1, 2 и 3 такта.

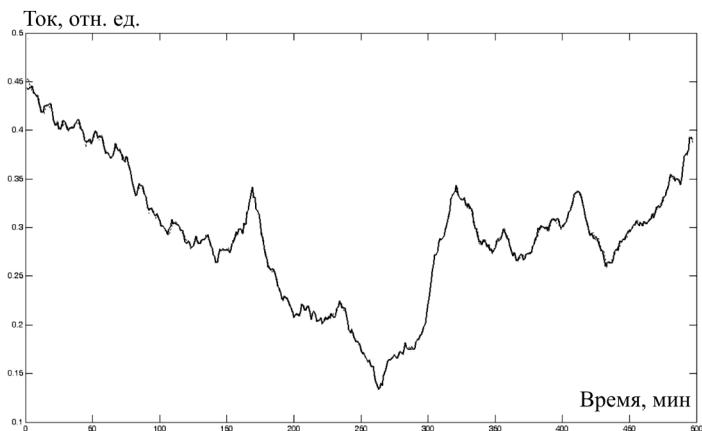


Рис. 7. График работы нейронной сети с тремя скрытыми слоями и дискретной задержкой сигналов на 1, 2 и 3 такта

Из графика видно, что выходной сигнал модели практически полностью повторяет сигнал реального значения тока на тестовой выборке. Высокое качество работы модели отражено и в численных значениях показателей качества. Численные значения показателей качества, полученных при использовании моделей различного вида, представлены в таблице.

Численные показатели качества моделирования при использовании нейронной сети

Метод построения модели	Обучающая выборка		Тестовая выборка	
	Значение функционала МНК	Коэффициент корреляции	Значение функционала МНК	Коэффициент корреляции
РА на основе полинома (1)	49,9588	0,5821	8,3704	0,1011
НС с двумя скрытыми слоями	9,2839	0,9361	0,8752	0,8364
НС с тремя скрытыми слоями	12,0503	0,9161	0,7714	0,8585
НС с дискретной задержкой входных сигналов на 1 такт	1,44	0,9903	0,209	0,9569
НС с дискретной задержкой сигналов на 1, 2 и 3 такта	0,0253	0,9998	0,0028	0,9994

3. Заключение

В работе была разработана математическая модель шаровой мельницы на основе нейронной сети с высокими показателями качества при работе на тестовой выборке, представляющей собой данные за иной временной промежуток, нежели обучающая. Это позволяет говорить о способности модели на основе нейронной сети аппроксимировать ранее неизвестные сигналы, что дает возможность разработки системы управления с использованием данного аппарата.

К недостаткам можно отнести достаточно большое время обучения нейронных сетей данного типа. Поэтому дальнейшим направлением работы выбрана попытка применения нейронных сетей с радиально-базисной функцией активации, которые за

счет изменения механизма обучения обладают существенно меньшим временем обучения.

Литература

1. АНДРЕЕВ С.Е. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых*. – М.: Недра, 1980. – 320 с.
2. КОЛМОГОРОВ А.Н. *Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей* // Изв. АН СССР. Сер. матем. – 1941. – Т. 5:1. – С. 3–14.
3. МАРЮТА А.Н. *Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитно-обогажительных фабриках*. – М.: Недра, 1975. – 328 с.
4. ОЛЕЙНИКОВ В.А., ТИХОНОВ О.Н. *Автоматическое управление технологическими процессами в обогажительной промышленности*. – М.: Недра, 1966. – 245 с.
5. ПОЛЕЩЕНКО Д.А., ЦЫГАНКОВ Ю.А. *Идентификация многопараметрического технологического объекта управления* // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы XIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием / НИТУ «МИСиС». – Старый Оскол, 2016. – С. 88–90.
6. УЛИТЕНКО К.Я. *Некоторые аспекты интеллектуального управления производительностью и качеством при обогащении железных руд* // Обогащение руд. – 2006. – № 6. – С. 33–37.
7. УЛИТЕНКО К.Я., МАРКИН Р.Г., СОКОЛОВ И.В. *Виброакустический анализ процессов дробления и измельчения на горно-обогажительных предприятиях* // Горный журнал. – 2009. – № 10. – С. 72–76.
8. MONOV V., SOKOLOV B., STOENCHEV S. *Grinding in Ball Mills: Modeling and Process Control* // Cybernetics and Information Technologies. – 2012. – Vol. 12, Iss. 2. – P. 51–68. ISSN (Online) 1314–4081, ISSN (Print) 1311–9702.
9. *Modeling of grinding process by artificial neural network for calcite mineral* / Y. UMUCU, M.F. ÇAĞLAR, L. GÜNDÜZ, V. BOZKURT, V. DENİZ // International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications. – Istanbul, 2011. – P. 344–348.

ON BALL MILL MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT

Yuri Eremenko, Sary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Sary Oskol, Doctor of Science, professor (erem49@mail.ru).

Dmitri Poleshchenko, Sary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Sary Oskol, Cand.Sc, associate professor (po-dima@yandex.ru).

Yuri Tsygankov, Sary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Sary Oskol, postgraduate student (TsY-18@yandex.ru).

Maksim Borovinskikh, Sary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Sary Oskol, student (bruh1100@gmail.com).

Abstract: The main scope of this research is to develop a ball mill mathematical model. This problem is actual nowadays since there is no universal method to control this plant current state. The most perspective approach is to develop the mill mathematical model, which allows to take into consideration the fact that many factors influence the plant behavior. Making matters worse, these factors relate to each other nonlinearly. This model will provide the opportunity to develop a ball mill automatic control system on the basis of measured technological parameters. Two methods are used to implement this approach to solve the problem under consideration: regression analysis using polynomials of different order and neural networks.

Keywords: ball mill, mathematical model, regression analysis, neural network, MatLab.

УДК 004.3
ББК 32.97

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО НЕЙРОНА В САМОМАРШРУТИЗИРУЮЩЕМСЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Каримова М.О.¹, Посягин А.И.²
*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

В статье рассматривается структура основного измерительного нейрона в самомаршрутизирующемся аналого-цифровом преобразователе. Проводится анализ надежности каждого блока нейрона, предложены методы повышения надежности и проведено сравнение этих методов.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, основной измерительный нейрон, вероятность безотказной работы, дублирование, мажоритирование.

Аналого-цифровые преобразователи предназначены для преобразования аналогового сигнала (обычно напряжения) в цифровую форму (последовательность цифровых значений, измеренных через равные промежутки времени).

В работе рассмотрена структура аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на основе нейронной сети (НС), разработанная на кафедре АТ студентами А.Ф. Васбиевой, Н.Г. Макогоновым и ассистентом А.И. Посягиным под руководством заведующего кафедрой профессора д.т.н. Южакова А.А.

Такая структура позволяет обеспечить адаптивность измерения, т.е. при быстром изменении сигнала грубо оценить это изменение с максимальной скоростью, в то же время при ста-

¹ *Марина Олеговна Каримова, студент-магистр (karimowa.marina@yandex.ru).*

² *Антон Игоревич Посягин, ассистент (posyagin.anton@gmail.com).*

бильном, слабо меняющемся сигнале повысить точность за счет увеличения количества разрядов [3]. АЦП включает в себя: компаратор, блок вычисления требуемой разрядности и нейронную сеть (рис. 1).

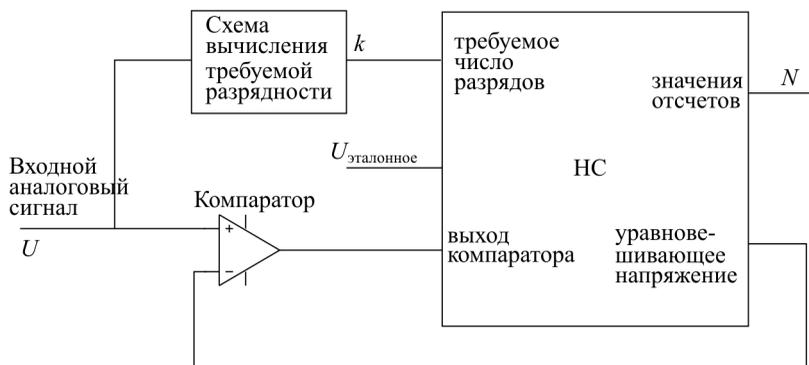


Рис. 1. Структурная схема одноходового нейросетевого самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя

В НС имеется слой основных измерительных нейронов, которые производят преобразование аналогового сигнала (рис. 2). Также есть входной и выходной слои, они связывают НС с внешними цепями АЦП и осуществляют вспомогательную функцию в процессе самомаршрутизации сигналов в НС.

Работа НС делится на три этапа [4]:

- этап формирования ИАЦП с определенным количеством разрядов;
- этап аналого-цифрового преобразования на сформированном ИАЦП;
- этап разрушения ИАЦП.

Базовым элементом нейронной сети является основной измерительный нейрон (ОИН). Структура ОИН включает в себя 3 основных блока (рис. 3): измерительную часть, систему контроля и систему управления. Для измерения применяется метод поразрядного взвешивания, а для его реализации используется матрица R-2R. Измерительная часть представляет собой одно

звено матрицы R-2R. Блок управления определяет порядок срабатывания нейронов. Блок контроля осуществляет контроль остальных узлов ОИН, определяя его состояние [1]. Кроме основных блоков в структуре имеются блоки входных и выходных ключей для соединения измерительной части одного ОИН с измерительными частями предыдущего и следующего ОИН для образования матрицы R-2R в ИАЦП.

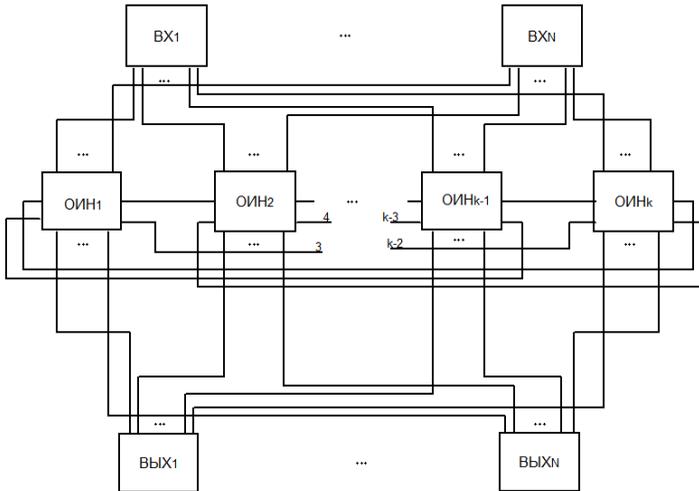


Рис. 2. Структурная схема однослойной нейронной сети

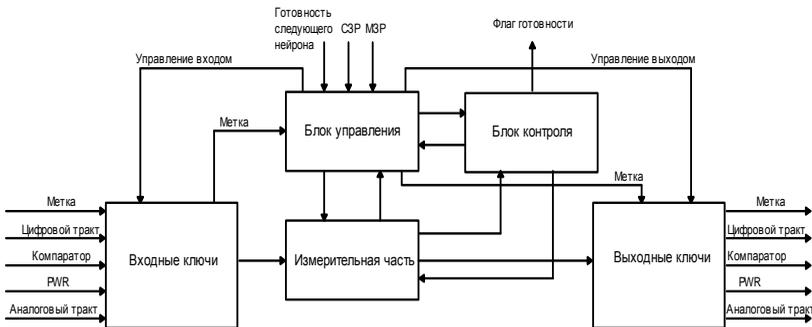


Рис. 3. Структурная схема ОИН в НС

Блок управления включен в измерительную часть, так как они взаимосвязаны. Блок управления определяет значения, формируемые измерительной частью. Для расчета вероятности безотказной работы каждого блока ОИН построены структурно-логические схемы каждого блока на базис $2_{и-не}$, выбран экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы [2]. Так как выбран экспоненциальный закон распределения, то для расчета вероятности безотказной работы достаточно знать интенсивность отказа для каждого элемента схемы (рис. 4).

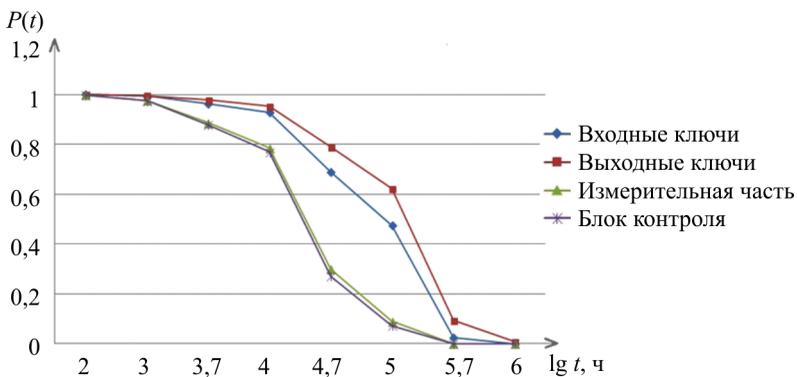


Рис. 4. График зависимости вероятности безотказной работы блоков ОИН от времени

Из графика видно, что наименее надежным блоком ОИН является блок контроля. Для повышения надежности блока контроля применим такие методы, как дублирование и мажоритирование [5]. Они являются частными методами резервирования, соответственно, так же как и резервирование, повышают надежность за счет введения запасных элементов. Резервировать в блоке контроля стоит наименее надежные элементы, так как это приведет к меньшим аппаратным затратам. Наименее надежным элементом является триггер.

Для дублирования триггера нужен второй триггер, подсоединенный параллельно, но в таком случае при сбое одного из них возникает проблема, какое из значений на выходе триггеров

верное. Для определения этого значения нужен элемент контроля, в работе используется элемент «исключающее ИЛИ», который сообщит о том, что триггеры выдают корректные значения. Так как элемент контроля сообщает только об ошибке, для нахождения верного сигнала необходимо еще раз продублировать эти триггеры с элементом контроля и последовательно к ним подключить элемент выбора сигнала (рис. 5).

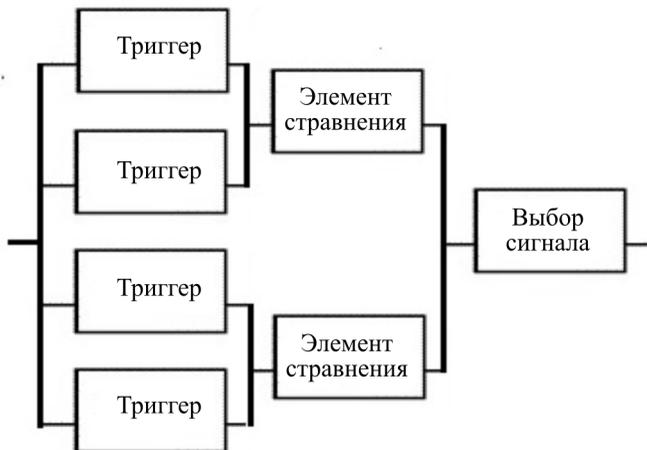


Рис. 5. Структурная схема дублирования триггера

Для мажоритирования триггера в схему подключаются три параллельно соединенных триггера, и последовательно им включается мажоритарный элемент (рис. 6).

Для сравнительного анализа схем с повышенной надежностью построены графики зависимости вероятности безотказной работы от времени (рис. 7).

Из графика видно, что применение методов повышения надежности повышает вероятность безотказной работы по сравнению с блоком контроля без дублирования и мажоритирования. Представленная на графике вероятность безотказной работы – это одна из составляющих надежности, также есть достоверность функционирования, которая тоже повышается.

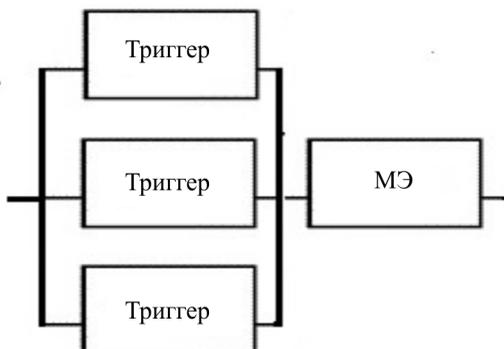


Рис. 6. Структурная схема мажоритирование триггера

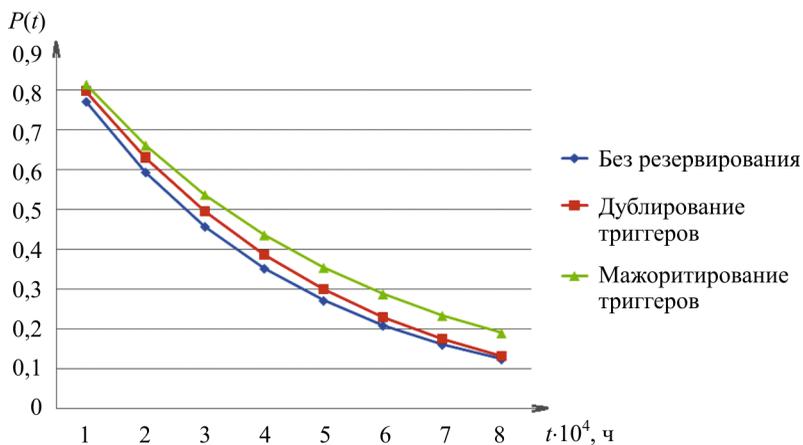


Рис. 7. График зависимости вероятности безотказной работы блока контроля от времени

Из двух методов повышения надежности наиболее оптимальным является метод мажоритирования, так как он менее затратный (таблица) в нем используется по два резервных элемента, а не три. Также у него вероятность безотказной работы больше, чем у дублирования (рис. 7).

Относительное увеличение аппаратных затрат на реализацию функциональной схемы блока контроля с различными типами резервирования

Тип схемы	Количество элементов $2_{и-не}$	Относительное увеличение аппаратных затрат
Блок контроля	31	–
Блок контроля с дублированием	75	142 %
Блок контроля с мажоритированием	55	77 %

Проанализировав результаты применения двух методов резервирования для повышения надежности, можно сделать вывод, что мажоритирование является более выгодным способом повышения надежности по ряду причин.

1. Большая вероятность безотказной работы блока контроля по сравнению со схемами без резервирования или с дублированием.

2. Повышение достоверности результатов работы блока контроля ОИН.

3. Меньшее увеличение аппаратных затрат на реализацию резервирования, по сравнению с дублированием практически вдвое.

По данной теме планируется вести дальнейшие исследования по улучшению надежности функциональных схем и уменьшению аппаратных затрат на их реализацию, обеспечению контроля и диагностики связей между ОИН.

Литература

1. ВАСБИЕВА А.Ф., ПОСЯГИН А.И., ЮЖАКОВ А.А. *Анализ работы основного измерительного нейрона самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети* // Информационные технологии в науке, образовании и управлении / под ред. проф. Е.Л. Глориозова. – М., 2015. – С. 240–246.
2. КОН Е.Л., КУЛАГИНА М.М. *Надежность и диагностика компонентов инфокоммуникационных и информационных систем* // М.: МЭИ, 2014. – 144 с.

но-управляющих систем. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 394 с.

3. ПОСЯГИН А.И., ЮЖАКОВ А.А. *Внутренняя структура основного измерительного нейрона в самомаршрутизирующемся аналого-цифровом преобразователе на основе нейронной сети* // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2014. – № 12. – С. 36–40.
4. ПОСЯГИН А.И., ЮЖАКОВ А.А. *Самомаршрутизирующийся аналого-цифровой преобразователь на основе двухслойной нейронной сети* // Нейрокомпьютеры. – 2013. – № 11. – С. 076–081.
5. СОРОКИН А.А., ВОРОБЬЕВ А.М. *Оценка показателей надежности радиоэлектронных устройств и систем при проектировании* // Ленингр. мех. ин-т им. Д.Ф. Устинова. – Л., 1989. – 78 с.

REVISITING THE RELIABILITY CALCULATION OF BASIC MEASURING NEURON IN SELF-ROUTING ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER

Marina Karimova, Perm National Research Polytechnic University, Perm, student (karimowa.marina@yandex.ru).

Anton Posyagin, Perm National Research Polytechnic University, Perm, assistant (posyagin.anton@gmail.com).

Abstract: This article deals with the structure of basic measuring neuron in self-routing analog-to-digital converter. Reliability of each neuron's block is analyzed, methods of reliability improvement are suggested and these methods are compared.

Key words: analog-to-digital converter, basic measuring neuron, probability of failure-free operation, redundancy, multiplexing.

УДК 62-503.51
ББК 32.966

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Бояршинова А.С.¹, Шумихин А.Г.²
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)

Рассмотрены подходы к применению искусственных динамических нейронных сетей в задачах идентификации и управления технологическими объектами. Предложены способы адаптивного управления, реализующие принципы разомкнуто-замкнутых и комбинированных систем регулирования, где в качестве модели выступает динамическая нейронная сеть. Приведены результаты оценки предложенных способов по данным моделирования. Исследованы подходы к параметрической идентификации управляемых технологических объектов передаточными функциями каналов «вход-выход» с использованием нейросетевой модели объекта. Приведены результаты оценки предложенных подходов по данным натурального эксперимента на лабораторной установке и в промышленных условиях, а также моделирования.

Ключевые слова: технологический процесс, нейронная сеть, моделирование, адаптивные алгоритмы, система регулирования, идентификация.

1. Введение

Процессы химической технологии как объекты управления отличаются транспортное запаздывание и инерционность каналов

¹ Анна Сергеевна Бояршинова, ассистент (boyarshinovaann@gmail.com).

² Александр Георгиевич Шумихин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой (atr@pstu.ru).

управления и контролируемых возмущений, существенная нестационарность характеристик их динамики, неконтролируемые возмущения со стороны внешней среды. Высокие требования к стабильности значений показателей качества производимой продукции и промышленной безопасности обеспечиваются в этих условиях высокой точностью поддержания управляемых технологических переменных процессов на соответствующих значениях, что требует применения улучшенных способов управления, например адаптивных алгоритмов, реализующих принципы разомкнуто-замкнутых и комбинированных систем регулирования с моделью.

В работе [1] предложен адаптивный ПИД-регулятор для объектов с пропорционально изменяющимися настроечными параметрами. В работе [2] предлагается адаптация параметров регулятора нейронной сетью, обученной по известным зависимостям настроечных коэффициентов регулятора от параметров модели объекта. Решить данную задачу для объекта с неизвестной зависимостью настроечных параметров регулятора от изменяющихся параметров модели объекта можно применив модель объекта для поиска оптимального значения управляющего воздействия. Причем в качестве инструмента моделирования технологического объекта предлагается использовать рекуррентную динамическую нейронную сеть.

Современные распределенные системы управления, применяемые на предприятиях химической отрасли, позволяют реализовать управляющие функции, повышающие качество процессов управления, например функцию компенсации разомкнуто-замкнутыми системами регулирования контролируемых возмущений. Настройка подобных алгоритмов требует идентификации соответствующих каналов объекта. Для случаев, когда невозможно идентифицировать нужные каналы передачи технологического объекта известными способами, предлагается использование нейронных сетей в качестве инструмента для идентификации взаимосвязей технологических переменных автоматизированных объектов.

Рекуррентные нейронные сети имеют в своем составе элементы в виде обратных связей и позволяет моделировать пове-

дение динамических объектов. Временные задержки входных сигналов и сигналов обратных связей позволяют моделировать поведение инерционных объектов с чистым запаздыванием, каковыми обычно являются управляемые объекты химической технологии. Обученная нейронная сеть может имитировать поведение динамического объекта или может быть использована для проведения на ней опытов вычислительного эксперимента, которые не могут быть реализованы на реальном промышленном объекте.

2. Нейросетевое регулирование

Разработаны два способа регулирования выходного параметра объекта управления с использованием его нейросетевой модели (рис. 1).

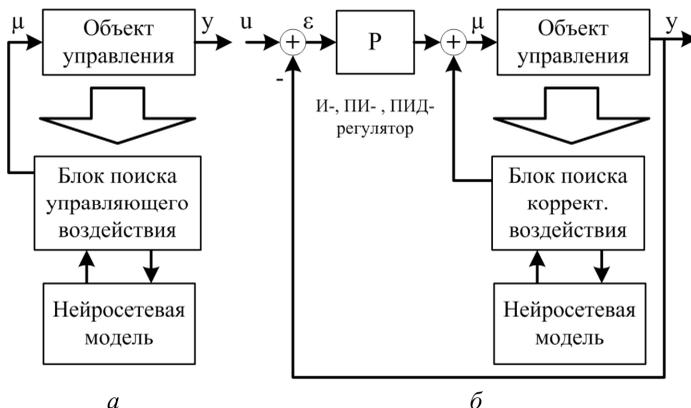


Рис. 1. Структура систем регулирования с использованием нейросетевой модели объекта:
 а – первый способ; б – второй способ

Первый способ заключается в нахождении для данного момента времени по нейросетевой модели объекта, при известных (измеренных) значениях входных возмущений, любым из методов нелинейного программирования значения управляющего воздействия с последующей его реализацией на объекте.

Второй способ отличается от первого тем, что ошибка регулирования минимизируется типовой системой автоматического регулирования «по отклонению», с И-, ПИ- или ПИД-регулятором с коррекцией управления, вычисленного регулятором, на величину, равную значению, вычисленному по первому способу. Величина выходного сигнала регулятора с И-составляющей в законе регулирования позволяет свести ошибку регулирования к нулю. Другими словами, второй способ позволяет теоретически свести ошибку регулирования к нулю по определению.

Проведен вычислительный эксперимент по исследованию предложенных систем и типовой системы регулирования (с ПИ-регулятором) на имитационном объекте. Имитационный объект представлен математической моделью аппарата-смесителя открытого типа двух жидких потоков с различной концентрацией одного и того же компонента, концентрация которого на выходе аппарата регулируется изменением расхода первого потока. Стабилизация уровня жидкости в аппарате достигается путем устройства естественного перелива из зоны смешения. Объект имеет различные запаздывания по каналам возмущений и управления.

Результаты эксперимента (рис. 2) показывают, что при случайных отклонениях возмущающих воздействий (концентрация компонента в первом потоке, расход второго потока и концентрация компонента во втором потоке) на входе смесителя от номинальных значений до 30 % выходная регулируемая величина объекта (концентрация компонента на выходе аппарата) поддерживается системой регулирования по первому способу с ошибкой, не превышающей 3 % от заданного значения. При отклонениях возмущающих воздействий от номинальных значений до 20 % регулируемая величина поддерживается системой регулирования по второму способу, с ошибкой, не превышающей 1,5 % от заданного значения. Система регулирования только с ПИ-регулятором, имеющим оптимальные настройки, при случайных отклонениях возмущающих воздействий от номинальных значений соответствующих параметров на входе смесителя до 25 % поддерживает выходную регулируемую величину объекта с ошибкой, не превышающей 8 % от заданного значения.

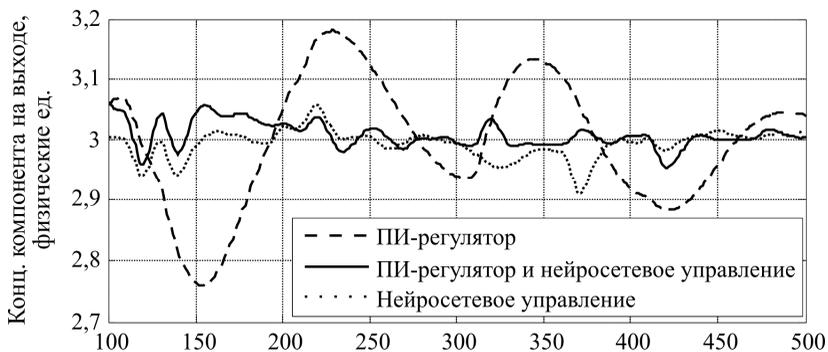


Рис. 2. Изменение выходной переменной объекта управления при различных способах регулирования

Анализ результатов эксперимента показал, что при одинаковом характере изменения возмущающих воздействий на входе объекта наименьшую ошибку регулирования обеспечивает система с ПИ-регулятором и дополнительным корректирующим воздействием, рассчитанным по нейросетевой модели.

К недостаткам предложенных способов можно отнести необходимость интеграции алгоритмов нейросетевого регулирования в действующую систему управления. Необходимо учитывать также соотношение инерционности процессов, протекающих в технологическом объекте, и скорости сходимости поискового алгоритма. Наличие дополнительного контура влияет на устойчивость всей системы регулирования.

Избежать подобных недостатков можно применив стандартные функции комбинированного управления с компенсацией контролируемых возмущений, включенные в состав действующей системы управления. Для настройки таких алгоритмов требуется идентификация соответствующих каналов технологического объекта. В случаях когда идентификация известными методами не может быть проведена, предлагается использовать динамическую нейронную сеть в качестве инструмента идентификации динамических объектов.

3. Идентификация динамического объекта с использованием его нейросетевой модели

Предлагаемый способ заключается в параметрической идентификации динамики объектов частотным методом по его нейросетевой модели. Предполагается сбор в режиме наблюдения информации об объекте в виде измеряемых временных трендов входных и выходных координат объекта. По экспериментальным данным обучается динамическая нейронная сеть.

На обученной нейросетевой модели проводится активный вычислительный эксперимент по определению частотных характеристик каналов передачи «вход-выход». Полученные в ходе эксперимента динамические характеристики аппроксимируются типовыми передаточными функциями объектов управления с запаздыванием.

На имитационном объекте с применением изложенного подхода удалось найти параметры объекта, отличающиеся от заданных не более чем на 4,5 % [3].

С целью испытания предложенного подхода в условиях, близких к реальным, проведены исследования на лабораторной установке (рис. 3). Объектом является эмулятор печи. Регулятор вырабатывает управляющее воздействие (изменение напряжения тока на нагревателе). Эмулятор печи обдувается проходящим через змеевик и сужающее устройство воздухом. Змеевик помещен на водяную баню. Температура воздуха, перепад давления на сужающем устройстве, температура печи и управляющее воздействие регистрируются. При проведении эксперимента на лабораторной установке контур регулирования температуры размыкался, и на выходе регулятора в ручном режиме реализовывался стационарный случайный процесс изменения управляющего воздействия с постоянным средним его значением. Температура подаваемого на обдув воздуха и перепад давления на сужающем устройстве в течение эксперимента изменялись.

По наработанным данным построена нейронная сеть, аппроксимирующая поведение лабораторного объекта. На нейросетевой модели проведен вычислительный эксперимент, найде-

ны параметры передаточных функций каналов. Построенная по найденным передаточным функциям модель объекта при имитационном моделировании выдает значение температуры печи по известным значениям перепада давления, температуры воздуха и управляющего воздействия с ошибкой не более 15 % от диапазона изменения температуры (рис. 4).

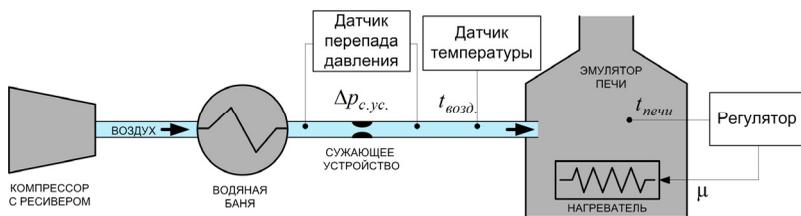


Рис. 3. Лабораторная установка

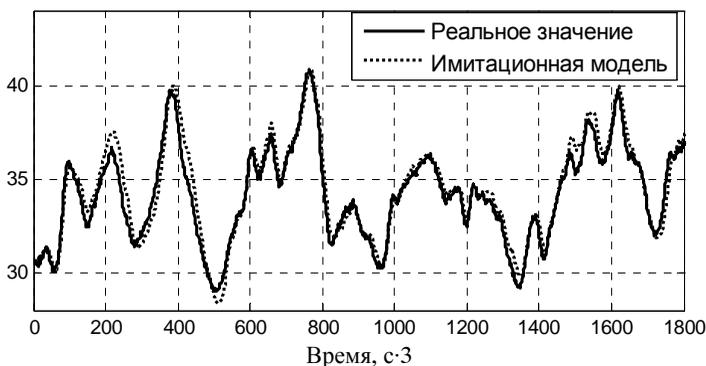


Рис. 4. Тестирование имитационной модели лабораторного объекта

Данный подход к идентификации технологических объектов ограничен случаем, когда объект в течение некоторого промежутка времени может быть переведен на ручной режим управления для проведения испытаний с реализацией стационарного случайного процесса на выходе регулятора.

4. Идентификация управляемого динамического объекта с использованием его нейросетевой модели

Управляемые технологические объекты могут быть идентифицированы по данным пассивных наблюдений за его координатами в режиме автоматического регулирования.

Предлагаемый способ заключается в параметрической идентификации динамики объектов с замкнутой системой регулирования частотным методом по нейросетевой модели системы. Сбор в режиме наблюдения информации осуществляется в виде измеряемых временных трендов входных и выходных координат управляемого объекта и регулятора. По экспериментальным данным обучается динамическая нейронная сеть.

Отличительной особенностью предлагаемого подхода является следующее. На основе обученной нейронной сети создается модель объекта с системой управления, состоящая из сети, имитирующей поведение управляемого объекта, и модели регулятора, формирующей сигнал управляющего воздействия, со структурой и значениями параметров, отвечающими алгоритму регулирования реальной системы (рис. 5). Модель регулятора обеспечивает адекватную исследуемому объекту работу его нейросетевой модели, так как нейронная сеть была обучена для условий функциональной зависимости значений управляющего воздействия регулятора от значений управляемой величины на выходе объекта.



Рис. 5. Модель объекта с системой управления

На построенной модели (см. рис. 5) проводится активный вычислительный эксперимент по определению частотных характеристик интересующих исследователя каналов передачи

«вход-выход». Экспериментальные динамические характеристики аппроксимируются типовыми передаточными функциями каналов управляемых объектов с запаздыванием.

Подход исследовался на имитационной модели системы регулирования. С применением изложенного подхода найдены параметры передаточной функции канала контролируемого возмущения объекта, отличающиеся от заданных не более чем на 6 % [4]. При исследовании управляемого лабораторного объекта (см. рис. 3) модель объекта в виде передаточных функций, найденных предложенным способом, прогнозирует температуру печи с максимальной абсолютной погрешностью не более 3,4 °С. Среднее квадратичное отклонение температуры печи от реального значения не превышает 1,2 °С.

С применением изложенного подхода проведена идентификация некоторых каналов промышленной вакуумной колонны, предназначенной для разделения предварительно нагретого мазута на фракции.

В качестве объекта идентификации взят контур регулирования уровня на «глухой» тарелке второго слоя насадки. Обучающая и тестовая выборки экспериментальных данных включают уровень на «глухой» тарелке второго слоя насадки, выходной сигнал регулятора и 5 параметров, оказывающих влияние на регулируемую величину, являющихся контролируемыми возмущениями. Обучена динамическая нейронная сеть. На основе обученной нейронной сети создана модель технологического объекта с системой регулирования. На модели технологического объекта с системой регулирования проведен вычислительный эксперимент по определению частотных характеристик каналов «вход-выход». По полученным данным каналы технологического объекта аппроксимированы передаточными функциями апериодического звена первого порядка с чистым запаздыванием.

Для сравнительной оценки полученных результатов построена имитационная модель технологического объекта (без системы управления), описанная найденными передаточными функциями каналов объекта. Коэффициент корреляции для прогнозируемого имитационной моделью уровня на «глухой» та-

релке второго слоя насадки и его реального значения превышает 0,6. Абсолютная погрешность не превышала 0,14 %, при диапазоне изменения уровня равного 0,33 %.



Рис. 6. Тестирование имитационной модели технологического объекта

5. Заключение

Рассмотрены подходы к применению искусственных динамических нейронных сетей в задачах управления и идентификации технологических объектов.

Предложенные способы адаптивного управления по модели, где в качестве модели выступает динамическая нейронная сеть, показали свою эффективность в рамках исследования методом имитационного моделирования.

Подходы к параметрической идентификации технологических объектов передаточными функциями каналов «вход-выход» по результатам вычислительных и натуральных экспериментов подтвердили корректность, а также высокую аппроксимирующую способность примененной динамической рекуррентной нейронной сети. Подходы применимы для идентификации управляемых технологических объектов с непрерывным характером процессов по данным наблюдений технологических переменных в режимах эксплуатации.

Литература

1. *Адаптивный ПИД-регулятор с минимизацией числа изменений выходного сигнала* / А.М. ШУБЛАДЗЕ, С.В. ГУЛЯЕВ, А.А. ШУБЛАДЗЕ, В.Р. ОЛЬШВАНГ, В.А. МАЛАХОВ, С.И. КУЗНЕЦОВ, А.В. КРОТОВ // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 12. – С. 7–10.
2. ШАРОВИН И.М., СМИРНОВ Н.И., РЕПИН А.И. *Применение искусственных нейронных сетей для адаптации САР в процессе их эксплуатации* // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012 – №. 4 – С. 27–32.
3. ШУМИХИН А.Г., БОЯРШИНОВА А.С. *Идентификация сложного объекта управления по частотным характеристикам, полученным экспериментально на его нейросетевой динамической модели* // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 4. – С. 125–134.
4. ШУМИХИН А.Г., БОЯРШИНОВА А.С. *Параметрическая идентификация управляемого объекта в режиме его эксплуатации с применением технологии нейронных сетей* // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2016. – № 19. – С. 102–110.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS APPLYING TO CHEMICAL-ENGINEERING PROCESSES CONTROL ALGORITHMS AND IDENTIFICATION TASKS

Anna Boyarshinova, Perm National Research Polytechnic University, Perm, assistant (boyarshinovaann@gmail.com).

Alexander Shumikhin, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Doctor of Technical Science, professor, head of department of automation of technological processes (atp@pstu.ru).

Abstract: We have considered approaches to artificial dynamic neural networks applying to chemical-engineering processes control algorithms and identification tasks. Control systems with adaptation algorithms outlined. The control systems are open-closed and com-

bined. A dynamic neural network represents a model of object. We show the control systems estimates by modeling. Results of research on control object parametric identification with its dynamic neural network model are given. Neural network is trained on the data of control object operating. The resulting model simulates the behavior of the system and lets us find the system's output, including outputs for periodic test influences. By the resulting complex frequency response we find the parameters of the channel transfer function. We show an example of identification for "input-output" channels with a delay of the imitational object under random noise at the input. Results of imitational modeling and full-scale experiments with laboratory and plant objects are given.

Keywords: technological process, neural network, modeling, adaptation algorithms, control system, identification.

УДК 621.771.23
ББК 78.34

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА ПОДКАТА В ПРОЦЕССЕ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

Мещерякова А.О.¹

*(Липецкий государственный технический
университет, Липецк)*

В работе предложена математическая модель, позволяющая отследить трансформацию поверхностных дефектов типа «раковина» на любой стадии деформации процесса холодной прокатки, а также приведены результаты исследования формоизменения дефекта с помощью конечно-элементного анализа. Материалы работы могут быть применены в металлургическом производстве для повышения качества поверхности холоднокатаных полос.

Ключевые слова: пластическая деформация, холодная прокатка, конечно-элементный анализ, напряжения, поверхностные дефекты

1. Введение

В настоящее время этап развития прокатного производства характеризуется постоянным ростом требований к качеству металлопроката. Для определения качества прокатной продукции используется большое количество характеристик, таких как химический состав, механические и химические свойства металла и др. Одной из наиболее значимых характеристик является на-

¹ Анастасия Олеговна Мещерякова, магистрант (mao11077@rambler.ru).

личие на поверхности металла дефектов, своевременное выявление которых исключает попадание брака на последующие этапы обработки.

Целью работы является исследование механизма формоизменения поверхностного дефекта горячекатаного подката типа «раковина» и полосы в процессе холодной прокатки, его моделирование, а также определение влияния технологических факторов процесса на выкатываемость дефектов поверхности для разработки режимов холодной прокатки, способствующих предотвращению образования поверхностных дефектов.

Исследование трансформации поверхностных дефектов проводилось путем построения математической модели процесса на основе теории плоской пластической деформации и кинематики прокатки, а также с помощью вычислительной системы конечно-элементного моделирования DEFORM-3D, которая предназначена для анализа трехмерного течения металла при различных процессах обработки металла давлением. Моделирование на ЭВМ с использованием МКЭ позволяет наглядно продемонстрировать картину видоизменения дефектов на каждом этапе прокатки листа и выполнить анализ дополнительных параметров.

2. Математическое моделирование процесса формоизменения поверхностного дефекта подката в процессе холодной прокатки

2.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА

В качестве математической модели трансформации поверхностного дефекта предложено рассматривать уравнение среднего контактного напряжения и критерий интенсивности сглаживания дефектов [4, 11].

Для вывода модели среднего контактного напряжения использовались основные уравнения плоской деформации, а также некоторые параметры очага деформации полосы и уравнение равновесия Кармана [1, 4, 5, 7, 8]. Пренебрегая влиянием упругих деформаций валков и полосы, получим [13, 15]:

$$(1) \quad p_{cp} = 1,15\sigma_{\phi} \left(1 + \frac{\mu l}{2h_{cp}}\right),$$

где p_{cp} – среднее контактное напряжение; h_{cp} – средняя толщина полосы; σ_{ϕ} – сопротивление металла пластичной деформации; μ – коэффициент трения.

Для описания процесса прокатки полосы с дефектом был принят критерий интенсивности сглаживания дефекта [2]:

$$(2) \quad \zeta_{\delta} = 0,19(1 - e^{-0,9n_{\sigma}^3}) \left[1 + \left(\frac{h_0^2}{b_{\delta}^2} + \frac{9h_0^2}{l_{\delta}^2}\right) + (0,04 + 0,004R_a^B)\right],$$

где n_{σ} – коэффициент напряженного состояния; b_{σ} , l_{σ} – ширина и длина поверхностного дефекта; R_a^B – шероховатость поверхности рабочих валков.

Относительная глубина дефекта на i -й стадии деформации определяется как

$$(3) \quad \frac{b_i}{h_i} = \frac{b_0}{h_0} - \zeta_{\delta} \ln\left(\frac{h_0}{h_i}\right),$$

где b_i , h_i – глубина дефекта и толщина полосы на i -й стадии деформации.

Анализируя результаты, представленные на рис. 1, можно сделать вывод, что дефекты небольшой глубины выкатываются интенсивнее, нежели дефекты с большей начальной относительной глубиной, но при высоких суммарных обжатиях есть риск повторного образования дефекта.

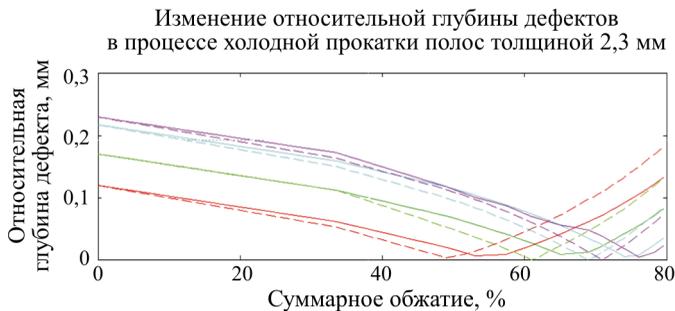


Рис. 1. График исследования зависимости относительных глубин дефектов от различных значений величин коэффициентов трения

Для повышения качества прокатываемых полос путем устранения поверхностных дефектов типа «вытравленная окалина» и «рябизна» предложено осуществлять прокатку со степенью суммарной относительной деформации, определяемой из выражения [14]

$$(4) \quad \varepsilon_{\Sigma(omn)} = 0,366 - 1,255\mu + 1,749 \frac{\delta_0}{h_0}.$$

2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА С ПОМОЩЬЮ МКЭ

Далее, по результатам работ [8, 9, 10, 12] было проведено математическое моделирование процесса формоизменения поверхностных дефектов типа «раковина» при холодной прокатке полосы на непрерывном пятиклетевом стане 1700 холодной прокатки с помощью специализированного программного комплекса DEFORM-3D.

Программный комплекс DEFORM-3D базируется на следующих основных зависимостях:

– дифференциальное уравнение равновесия

$$(5) \quad \frac{\partial \sigma_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{iz}}{\partial z} + G_i = 0,$$

– уравнение зависимости между вектором перемещений и компонентами тензора деформаций

$$(6) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} \right).$$

Поле допустимых скоростей узловых точек конечных элементов в матричном виде

$$(7) \quad v_i = [N]\{v_B\},$$

где $[N]$ – функция формы элемента; $\{v_B\}$ – вектор узловых скоростей.

Условие пластичности Губера–Мизеса

$$(8) \quad \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} = \bar{\sigma}^2,$$

где σ_{ij}' – девиатор напряжений;

(9) $\bar{\sigma} = \sigma_{\phi} = \sigma_{исх} + a\varepsilon^b$ – предел текучести, представленный известным соотношением Третьякова–Зюзина, применимым для процессов холодного деформирования.

Напряжения трения на контактной поверхности определяется согласно закону Кулона–Амонтона

$$(10) \quad \bar{\tau} = \mu \bar{\sigma},$$

где μ – коэффициент трения.

При моделировании процесса холодной прокатки были приняты следующие допущения:

– влияние упругих деформаций валков и полосы не учитывается;

– скорость прокатных валков постоянна на протяжении каждого прохода;

– отсутствие уширения полосы.

При помощи SolidWorks и КОМПАС-3D, программных комплексов САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства была смоделирована некоторая область подката начальной толщиной 4,5 мм. На поверхности полосы было смоделировано четыре поверхностных дефекта типа «раковина» разной глубины и с разным переходом к кратеру дефекта (рис. 2).

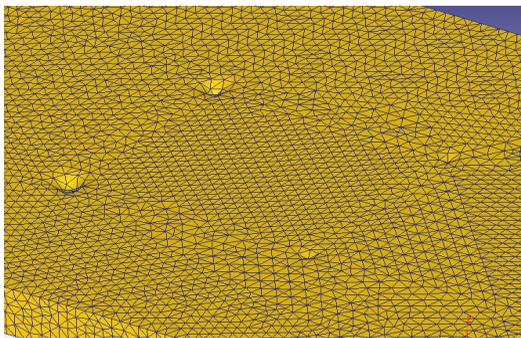


Рис. 2. Поверхность фрагмента смоделированной полосы с дефектами

Диаметр рабочих валков принимали равным 600 мм. В качестве материала полосы задавалась конструкционная углеродистая качественная сталь из базы программного комплекса DEFORM-3D, аналогичная стали 08кп. Предел текучести был рассчитан в соответствии с данными, предложенными базой DEFORM-3D для конкретной марки стали. Начальные глубины дефектов принимались равными 0,45 и 0,99 мм. Скорость прокатных валков полагалась постоянной на протяжении каждого прохода. Температура прокатки задавалась стандартной величиной для процессов холодной деформации, равной 20 °С. На контакте полосы с прокатными валками были заданы коэффициенты трения, равные 0,03 и 0,07, что соответствует условиям холодной прокатки.

Координатная сетка для области подката была задана оптимальной для решения данной задачи величиной – 150 000 элементов.

Согласно работе [3, 6], поверхностный дефект горячекатаных полос «раковина» имеет округлую форму, иногда вытянутую вдоль направления прокатки и чаще всего с плавным переходом от поверхности металла к кратеру дефекта. Данный дефект отличается от дефекта «рябизна» большим размером. В работе рассматривается модель поверхностного дефекта с конусообразным дном, что соответствует наблюдениям о пологом переходе к кратеру дефекта, а также дефекты округлой формы небольшой относительной глубины.

Процесс формоизменения поверхностного дефекта типа «раковина» с начальной глубиной 0,99 мм с конусообразным видом кратера представлен на рис. 3–6.

При увеличении суммарного обжатия до $\varepsilon_{\Sigma} = 45,56\%$ поверхностные дефекты в процессе холодной прокатки в обоих случаях полностью выкатываются.

Рассмотрим процесс изменения относительной глубины дефекта с конусообразной и округлой формой кратеров при различных величинах обжатия с коэффициентом трения, равным $\mu = 0,07$ (рис. 7, 8).

Далее был проведен анализ напряженного состояния на участках поверхности дефектов в центре кратера и на середине стенки дефекта.

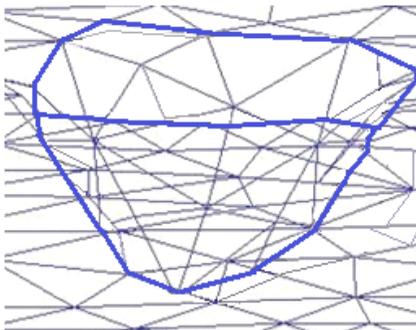


Рис. 3. Исходная форма дефекта с конусообразным кратером относительной глубиной 0,23 мм

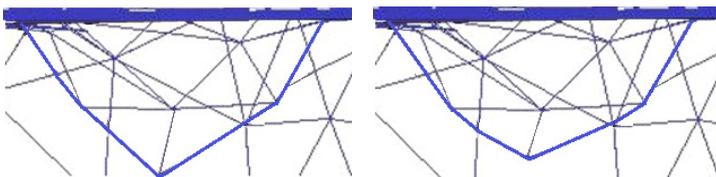


Рис. 4. Формоизменение дефекта при $\varepsilon_{\Sigma} = 19,9\%$ и $\mu = 0,03$, $\mu = 0,07$



Рис. 5. Формоизменение дефекта при $\varepsilon_{\Sigma} = 35,11\%$ и $\mu = 0,03$



Рис. 6. Формоизменение дефекта при $\varepsilon_{\Sigma} = 35,11\%$ и $\mu = 0,07$

Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами

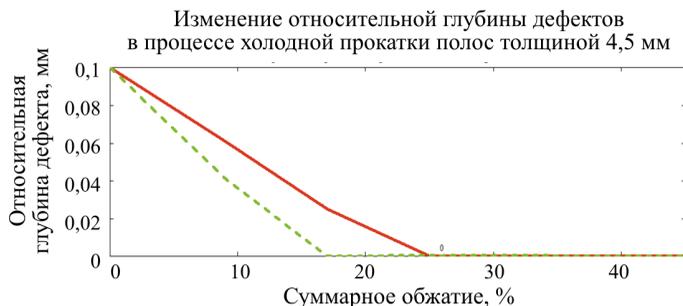


Рис. 7. Процесс выкатывания дефектов с относительной глубиной 0,1 мм при $\mu = 0,07$, где красной линией обозначено изменение относительной глубины дефектов с конусообразной формой крatera, зеленой – с округлой

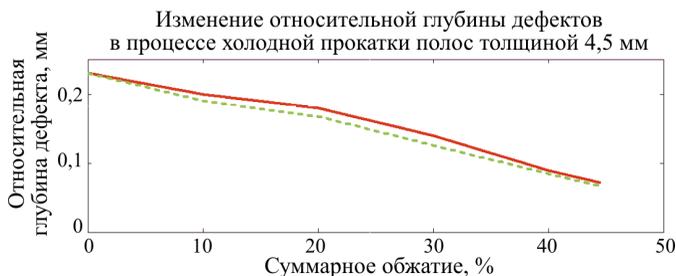


Рис. 8. Процесс выкатывания дефектов с относительной глубиной 0,22 мм при $\mu = 0,07$, где красной линией обозначено изменение относительной глубины дефектов с конусообразной формой крatera, зеленой – с округлой

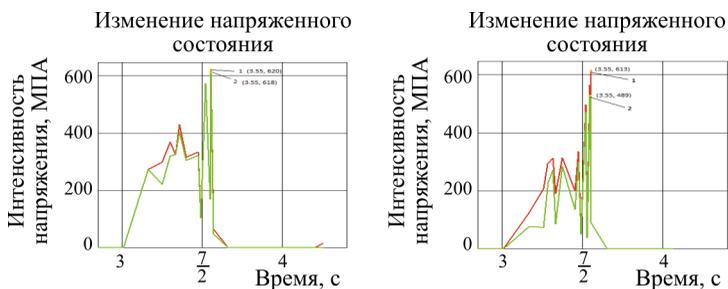


Рис. 9. Напряженное состояние в точках дефекта с округлой и конусообразной формой крatera

Анализируя полученные графики на рис. 9 можно сделать вывод, что дефекты с округлой формой кратера являются менее критичными недостатками подката, так как разность направлений в точках минимальна, что позволяет говорить о равномерном распределении напряжений.

Проведено исследование процесса трансформации поверхностных дефектов типа «раковина» путем построения математической модели, разработанной на основе теории плоской пластической деформации и кинематики прокатки, а также при использовании возможностей вычислительной системы конечно-элементного моделирования DEFORM-3D для получения более точных результатов и построения графической картины формоизменения дефектов и анализа дополнительных параметров, таких как уровень напряжения.

Литература

1. АРКУЛИС Г.Э., ДОРОГОБИД В.Г. *Теория пластичности*. – 3-е, стереотип. – М.: Металлургия, 1987. – 352 с.
2. БАРМИН Г.Ю. *Регламентация качества поверхности подката, режимов холодной прокатки и дрессировки при производстве тонкой и тончайшей жести*: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Ин-т черной металлургии им. И.П. Бардина. – М., 1990. – 350 с.
3. БАХТИНОВ В.Б. *Технология прокатного производства*. – М.: Металлургия, 1983. – 448 с.
4. БРЕЖНЕВА Д.А., ГАЛКИН А.В., МЕЩЕРЯКОВА А.О. *Моделирование процессов деформации дефектов поверхности при холодной прокатке*. Управление большими системами (УБС'2016). – М.: ИПУ РАН, 2016. – С. 553–560.
5. ВАСИЛЬЕВ Я.Д. *Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки*. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
6. ВУСАТОВСКИЙ З.А. *Основы прокатки*. – М.: Металлургия, 1963. – 575 с.
7. ДЖОНСОН У., МЕЛЛОР П. *Теория пластичности для инженеров*. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.

8. ЕРЖАНОВ А.С. *Оптимизация параметров листовой прокатки низкоуглеродистых сталей на основе обеспечения выкатываемости поверхностных дефектов*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Темиртау, 2016. – 18 с.
9. КАЧАНОВ Л.М. *Основы теории пластичности*. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
10. КОЛМОГОРОВ В.Л. *Напряжения, деформации, разрушения*. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
11. ПИМЕНОВ В.А., ГАЛКИН А.В., МЕЩЕРЯКОВА А.О. *Моделирование и исследование процессов деформации дефектов поверхности проката* // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы Двенадцатой Всерос. науч.-практ. конф., Т. II, 25–27 ноября 2017 г. – Старый Оскол, 2015. – С. 217–223.
12. *Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D* / В.С. ПАРШИН, А.П. КАРАМЫШЕВ, И.И. НЕКРАСОВ, А.И. ПУГИН, А.А. ФЕДУЛОВ. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2010. – 265 с.
13. СОКОЛОВСКИЙ В.В. *Теории пластичности*. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
14. ФЕДОРОВ В.В. *Теория оптимального эксперимента*. – М.: Наука, 1971. – 256 с.
15. ЦЕЛИКОВ А.И., НИКИТИН Г.С., РОКОТЯН С.Е. *Деформация металла при прокатке*. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF FORMING OF SURFACE DEFECTS OF THE PROCESS OF COLD ROLLING WITH THE USE OF THE FINITE ELEMENT ANALYSIS COMPLEX PROGRAM

Anastacia Mescheryakova, Lipetsk State Technical University, undergraduate (mao11077@rambler.ru).

Abstract: Nowadays the stage of development of rolling is characterized with a constant growth of quality specifications of metal-roll. A vast quantity of different characteristics is used for the metal-

rolling output performance measurement. They are the chemical composition, macro- and microstructure, mechanical properties and processing characteristics, the fraction of non-metallic inclusions, special characteristics, etc. The timely exposure of superficial defects excludes defective goods occurrence during further procedures, it can also be helpful in defining the possibilities of refuse birth, in decided about the reasons of waste and taking measures to prevent defect formation. The defining of dependence of smoothing of superficial defects named "scale pit" from its size, mechanical characteristics of the deformed body and technological factors of cold rolling for the defining of quality specifications to the hot-rolled sheet is an urgent problem. The mathematical model offered in this work allows tracking the transformation of hole defects at any deformation stage of the cold rolling process as well as well as the results of the investigation of defect deformation with the use of the finite-element analysis. Work materials can be applied in metallurgical engineering to improve the surface quality of cold rolled steel.

Keywords: fundamentals of plastic deformation, cold rolled strip, finite-element analysis, stresses, surface defects.

УДК 004.932.2
ББК 3973.235

ВЫБОР АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Южаков А.А.¹, Тур А.И.²

(Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь)

В последнее время весьма актуальна проблема машинного зрения. Это обусловлено увеличивающимися темпами автоматизации во всех сферах человеческой деятельности. Для успешной реализации такой системы важно правильно выбрать алгоритмы, используемые для распознавания. В данной статье даётся обзор некоторых популярных алгоритмов.

Ключевые слова: машинное зрение, алгоритмы, распознавание, контроль качества.

1. Введение

В последнее время весьма актуальна проблема машинного зрения. Это обусловлено увеличивающимися темпами автоматизации во всех сферах человеческой деятельности.

Машинное зрение позволяет повысить скорость работы в тех случаях, когда человеческие возможности оказываются ограничивающим фактором. Кроме того, данные разработки позволяют не подвергать человеческую жизнь опасности при необходимости работы в опасных условиях.

Задачу реализации машинного зрения можно разделить на три этапа работы с изображением:

- 1) фильтрация изображения для вычленения информации;
- 2) логическая обработка результатов фильтрации;
- 3) принятие решения на основе логической обработки.

¹ Александр Анатольевич Южаков, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой (edu@at.pstu.ac.ru).

² Александр Игоревич Тур, аспирант (tur.aleksandr93@mail.ru).

В зависимости от конкретных условий реализации и поставленной задачи некоторые этапы могут объединяться или исключаться полностью [1].

Выбор используемого метода на каждом из этапов должен соответствовать поставленной цели и быть максимально простым. В противном случае при реализации разработанная система может значительно проигрывать в скорости и надёжности распознавания.

Сформулируем основные критерии, по которым стоит делать выбор:

- ◆ качество распознавания;
- ◆ быстродействие;
- ◆ общая сложность реализации.

В следующих разделах будут рассмотрены некоторые наиболее популярные алгоритмы, сгруппированные по возможным целевым объектам распознавания.

2. Фильтрация

Под фильтрацией изображения будем понимать все действия, направленные на извлечение информации из изображения. Все они отличаются способом считывания изображения (включая предобработку) и формой дальнейшего представления полученной информации.

Сканирование каждого пикселя является самым тривиальным способом распознавания объекта. Он заключается в разбиении изображения на множество точек и дальнейшую запись информации о них.

Данный способ фильтрации может успешно применяться в задачах, связанных с измерением площади или фиксацией движения. Его скорость и качество работы напрямую зависит от разрешения анализируемого изображения. Он прост в реализации и позволяет пренебречь сложными математическими расчётами, однако сильно страдает от возможных изменений окружающих условий (освещённость и прочее). Этот недостаток можно разрешить применением дополнительного алгоритма, отделяющего фон изображения от объекта.

Отделение проводится с помощью порогового метода – бинаризации изображения. Для RGB-изображения и изображения в градациях серого порогом является значение цвета. Бинаризация изображения отлично справляется с задачей автоматического выделения предметов на однородном контрастном фоне.

Выбор порога, по которому происходит бинаризация, во многом определяет процесс самой бинаризации. В случае, представленном на рис. 1, изображение было бинаризовано по среднему цвету. Обычно бинаризация осуществляется с помощью алгоритма, который адаптивно выбирает порог [2].



Рис. 1. Бинаризация изображения

Дополнительная обработка, несомненно, увеличивает время работы алгоритма, однако позволяет избавиться от большинства недостатков вышеназванного подхода, в случае если требуется измерять площадь или распознавать объект по форме.

В обоих случаях результатом предобработки могут быть либо растровые изображения, либо матрицы с числами, соответствующими цветовому значению обработанных пикселей. Пример такой матрицы показан на рис. 2.

Представление информации об изображении таким способом успешно применяется для свёртки.

Иная разновидность данного подхода является средним вариантом между уже озвученными. Такой алгоритм старается выделить на изображении определённый цвет и распознаёт только его. Быстродействие по сравнению с бинаризацией, конечно, становится выше, но повышаются и требования к обрабатываемому изображению и распознаваемому объекту.

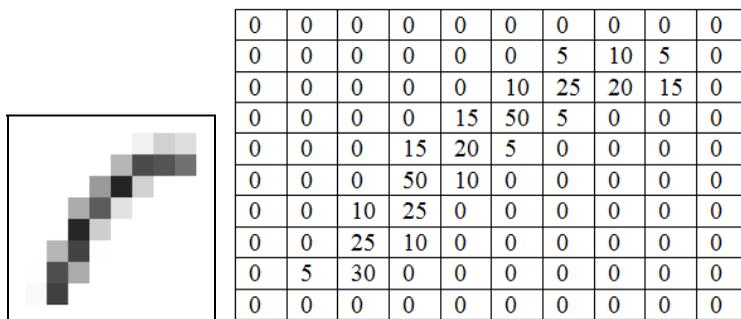


Рис. 2. Матрица распознаваемой линии

Есть принципиально отличные от названных методы, основанные на поиске особых точек на изображении – уникальных характеристик объекта, которые позволяют сопоставлять объект сам с собой или с похожими классами объектов. Существует несколько десятков способов, позволяющих выделить такие точки. Некоторые способы выделяют особые точки в соседних кадрах, некоторые через большой промежуток времени и при смене освещения, некоторые позволяют найти особые точки, которые остаются таковыми даже при поворотах объекта.

Кроме того, достаточно популярны способы сбора информации об изображении с помощью различных преобразований, таких как Фурье, Гаусса, Габора и Хафа. Первые три ориентированы на изменение изображения посредством фильтров разных частот, приводя картинку к общему виду. Последнее представляет собой чисто математический фильтр, позволяющий обнаружить простую математическую функцию на изображении (прямую, параболу, круг) и построить аккумулирующее изображение, в котором для каждой точки исходного изображения отрисовывается множество функций, её порождающих.

Стоит также упомянуть фильтрацию изображений с помощью корреляции. Этот метод позволяет эффективно обнаруживать перемещение объектов.

Таким образом, все методы фильтрации можно грубо описать следующими параметрами.

1) Предобработка изображения:

- ◆ работают с изображением, не изменяя его;
- ◆ преобразуют изображение в бинарное;
- ◆ преобразуют изображение согласно особой функции фильтра;

2) Считывание и сохранение информации:

- ◆ о каждом пикселе в отдельности;
- ◆ о группе пикселей определённых участков;
- ◆ о типе последовательностей пикселей;
- ◆ о наличии изменения пикселя от исходного изображения.

3. Логическая обработка результатов фильтрации

После сбора информации, как правило, необходимо провести её анализ. Методы этой группы нельзя назвать универсальными, и они требуют входную информацию в определённом виде. Поэтому при разработке систем в первую очередь нужно определиться с используемым алгоритмом распознавания.

Задача методов на стадии логической обработки – рассчитать некое значение, которое в дальнейшем будет использоваться для принятия решения. Рассмотрим некоторые методы.

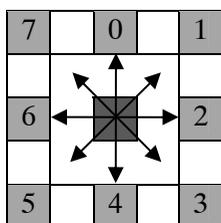
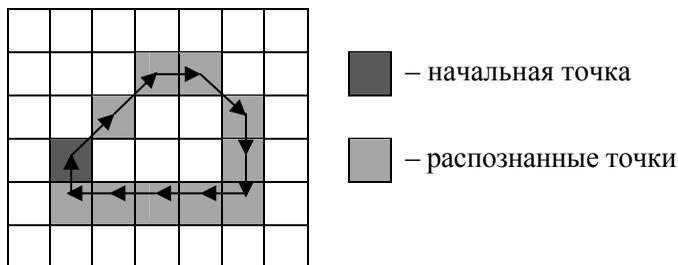
Задачи подсчёта площади можно решать двумя разными способами – получением размеров объекта и дальнейшим расчётом по формулам либо, если объект сложной формы, подсчётом количества пикселей, занимаемых объектом, и сопоставлением их с предварительно рассчитанной площадью.

Второй способ простой и достаточно быстрый, однако может иметь погрешности при неправильных настройках и некачественных входных данных. Для первого же способа требуются дополнительные вычисления, что замедляет общую работу алгоритма.

При распознавании объектов на контрастном фоне оптимально использовать изображение, заранее приведённое к бинарному виду. На этом изображении производится выявление контура объекта любым алгоритмом контурного анализа. Примером может служить цепной код Фримана (рис. 3) [2].

Полученный код полностью описывает распознанный объект и может быть использован как для расчёта площади, так

и для распознавания типа объекта путем сопоставления полученных контуров с базой шаблонов распознаваемых объектов. Но для подобной реализации требуется очень хорошее качество изображения, так как различный шум может серьезно снизить эффективность распознавания.



Код контура:
11234466660

Рис. 3. Пример расчёта цепным кодом Фримана

Менее чувствителен к шумам другой алгоритм распознавания объектов – свёрточный фильтр. Он, как правило, работает с матричным представлением информации об объекте, как показано на рис. 2.

Для распознавания он умножает значения полученной матрицы на значения из матрицы фильтра. В фильтре аналогичным способом закодирован искомый объект. И, как нетрудно догадаться, чем выше значение в перемноженных матрицах, тем больше найдено совпадений объекта на картинке с искомым объектом.

Как уже было сказано, существуют алгоритмы, оценивающие изображения по отдельным особым участкам изображения – особым точкам. Они также применяются для распознавания объектов, и их условно можно разделить на три класса [3].

Первый класс (самый быстрый, менее сложный) – особые точки, являющиеся стабильными на протяжении секунд. Такие точки служат для того, чтобы вести объект между соседними кадрами видео или для сведения изображения с соседних камер. К таким точкам можно отнести локальные максимумы изображения, углы на изображении (детектор Хариса), точки, в которых достигаются максимумы дисперсии, определённые градиенты и т.д.

Второй класс (ощутимо медленнее) – особые точки, являющиеся стабильными при смене освещения и небольших движениях объекта. Такие точки служат в первую очередь для обучения и последующей классификации типов объектов. К таким точкам относятся точки, найденные методом гистограмм направленных градиентов (HOG).

Третий класс (самый медленный из перечисленных, но показывающий самые продуктивные результаты) – стабильные точки. Самые распространённые методы из этой группы – SURF и SIFT. Они позволяют находить особые точки даже при повороте изображения. Расчёт таких точек осуществляется дольше по сравнению с остальными методами, но за достаточно ограниченное время.

Существует много других алгоритмов распознавания. Почти все из них имеют чёткую направленность на определённую задачу распознавания. Остановимся на перечисленных как на наиболее популярных.

4. Принятие решения на основе логической обработки

В случаях когда не требуется высокая точность определения, этот этап можно свести к минимуму – определению, преодолело ли значение, высчитанное на предшествующем этапе, определённый порог. Но в остальных случаях приходится применять различные дополнительные алгоритмы анализа.

Задачи, связанные с определением объекта, могут высчитывать вероятность того, что перед ними находится объект из базы поиска. Другими словами, насколько похож анализируемый

объект на искомые. Примером такого подхода может быть свёрточная нейронная сеть.

Заключение

Выбор того или иного алгоритма распознавания прежде всего связан с объектами, которые требуется распознавать. Конечно, многие алгоритмы позволяют использовать себя для достаточно широкого круга задач, но в таких случаях, как правило, страдает вероятность распознавания или повышаются требования к условиям, при которых происходит распознавание (например, определённый фон и освещение).

Следующим важным фактором является способ сбора информации об объекте с изображения. Иногда можно упростить фильтрацию изображения для сокращения времени работы всего алгоритма распознавания. Однако при упрощении первых двух этапов может возникнуть потребность в использовании дополнительных сложных алгоритмов принятия решения.

Кроме того, не стоит забывать, что иногда проще решить проблему на физическом уровне, чем программном (например, намного проще использовать для распознавания изображения хорошего качества, чем усложнять алгоритм распознавания дополнительными фильтрами, подавляющими шумы).

Литература

1. ИВАНЬКО М.А., КЛЕПИКОВА А.В. *Системы искусственного зрения* // Вестник МГУП им. Ивана Фёдорова – 2015. – № 5.
2. *Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практ. занятий* / Ю.В. ВИЗИЛЬТЕР, С.Ю. ЖЕЛТОВ, А.В. БОНДАРЕНКО, М.В. ОСОСКОВ, А.В. МОРЖИН. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
3. ЯНЕ Б. *Цифровая обработка изображений* – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.

CHOICE OF ALGORITHMS FOR IMPLEMENTATION OF THE SYSTEM OF MACHINE VISION

Aleksandr Anatolyevich Yuzhakov, head of department, professor, D.Sc. Perm National Research Polytechnic University (Perm, 7 Professora Pozdeeva Street, 614013) (edu@at.pstu.ac.ru).

Aleksandr Igorevich Tur, postgraduate student. Perm National Research Polytechnic University (Perm, 7 Professora Pozdeeva Street, 614013) (tur.aleksandr93@mail.ru).

Abstract: Recently the problem of machine vision is very urgent. Machine vision makes it possible to increase the speed of work in cases where human capabilities are a limited factor.

The task of implementing computer vision, in general, can be divided into three stages of working with the image: image filtration, logical processing, decision making.

The choice of the method used at each stage should correspond to the goal and be as simple as possible.

The choice of this or that recognition algorithm is primarily related to the objects that need to be recognized. Of course, many algorithms allow you to use yourself for a fairly wide range of tasks, but in such cases, as a rule, the probability of recognition suffers or the requirements to the conditions under which recognition occurs are increased.

The next important factor is the way to collect information about the object from the image. Sometimes you can simplify the filtering of the image to shorten the working time of the entire recognition algorithm. However, with simplification of the first two stages, there may be a need to use additional complex decision algorithms.

Keywords: machine vision, algorithms, recognition, quality control.

УДК 004.89:681.51

ББК 32.813

РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОГО НАСТРОЙЩИКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Глущенко А.И.¹, Петров В.А.²

*(Старооскольский технологический институт
им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС»,
Старый Оскол)*

В данной статье рассматривается возможность применения нейросетевого настройщика параметров линейных регуляторов в системе управления электроприводом постоянного тока в режиме отработки возмущающих воздействий. Проведены эксперименты по компенсации возмущений на экспериментальном стенде National Instruments. Возмущение реализовывалось ступенчатым уменьшением сигнала в канале управления. Нейросетевой настройщик позволил по сравнению с системой управления без настройки параметров ПИ-регулятора скорости снизить максимальное отклонение скорости от заданной на 8 %, а также снизить время компенсации возмущения на 30 %.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, ПИ-регулятор, отработка возмущений, нейросетевой настройщик.

1. Введение

Компенсация возмущающих воздействий является неотъемлемой частью технологических процессов многих промышленных агрегатов. В том числе возмущениям подвергаются

¹ Антон Игоревич Глущенко, кандидат технических наук, доцент (г. Старый Оскол, м-н Макаренко, д.42, (4725) 45-12-17, strondutt@mail.ru).

² Владислав Анатольевич Петров, аспирант (79040882508@ya.ru).

электроприводы постоянного тока в горной и металлургической отраслях промышленности [2, 3], что и является предметом рассмотрения данной статьи.

Как правило, системы управления электроприводов постоянного тока работают в режимах отработки графика изменения задания и отработки возмущающих воздействий с одним набором параметров линейных регуляторов в контурах тока и скорости.

Но регулятор, оптимально настроенный на переходные процессы, в большинстве случаев неэффективно обрабатывает возникающие в установившемся режиме возмущения [6]. Это, если принять во внимание высокую энергоемкость процессов, характерных для упомянутых отраслей промышленности, позволяет говорить о существенных энергопотерях. Решением данной проблемы может стать построение адаптивной системы управления электроприводом для режима компенсации возмущающих воздействий.

На основе проведенного анализа методов решения указанной задачи возможно выделить следующие основные подходы:

- ◆ изменение структуры регулятора (системы управления) с последующей идентификацией ОУ в режиме возмущений [16];
- ◆ идентификация ОУ в режиме возмущений с построением адаптивного наблюдателя координат состояния [4, 8, 14, 15];
- ◆ построение адаптивной системы на базе эталонной и внутренней моделей [14, 15, 17];
- ◆ применение методов модального управления для настройки регулятора на подавление возмущений [7, 12].

Данные подходы требуют наличия адекватной модели процесса или эталонной модели, что является трудновыполнимой задачей в условиях производства.

Таким образом, целесообразно использовать метод построения адаптивной системы управления, который не требует наличия модели объекта управления. Таким методом является нейросетевой настройщик параметров линейных регуляторов [1], который необходимо доработать для решения рассматриваемой задачи.

2. Постановка задачи

В данной работе предполагается изменять настройку ПИ-регулятора скорости двигателя постоянного тока во время обработки ступенчатого возмущения для повышения скорости отработки и уменьшения максимального отклонения частоты вращения от величины уставки. Для этого предлагается проводить оперативную адаптацию параметров регулятора скорости с помощью нейросетевого настройщика при выявлении возмущающих воздействий. Необходимо осуществить выбор структуры нейронной сети настройщика, а также разработать базу правил для режима компенсации возмущений.

3. Нейросетевой настройщик для отработки возмущающих воздействий

Нейросетевой настройщик для отработки возмущений представляет собой надстройку над ПИ-регулятором скорости и состоит из искусственной нейронной сети и базы правил (рис. 1).

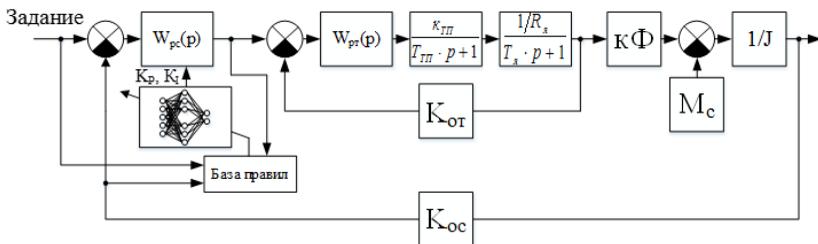


Рис. 1. Структурная схема электропривода постоянного тока с нейросетевым настройщиком в контуре скорости

На рис. 1: W_{pc} – передаточная функция ПИ-регулятора скорости; W_{pt} – передаточная функция ПИ-регулятора тока; $k_{тп}$ – коэффициент усиления тиристорного преобразователя; $T_{тп}$ – постоянная времени тиристорного преобразователя; $R_{я}$ – суммарное сопротивление якорной цепи; $T_{я}$ – электромагнит-

ная постоянная времени якорной цепи; J – момент инерции электропривода; K_{om} – коэффициент обратной связи по току; K_{oc} – коэффициент обратной связи по скорости; M_C – момент нагрузки.

Основным требованием к нейронной сети является возможность «обрабатывать» ту же информацию, что и настраиваемый регулятор. Согласно [9] для сколь угодно точной аппроксимации любой функции многих переменных достаточно двухслойной структуры НС при условии, что в скрытом слое использована нелинейная функция активации. Таким образом для решения поставленной задачи будет достаточно двухслойной НС: входной слой – скрытый слой – выходной слой.

Для определения количества нейронов во входном слое НС рассмотрим ПИ-регулятор. Передаточная функция ПИ-регулятора в дискретной форме может быть описана в виде

$$(1) \quad W_c(z) = K_p + \frac{K_I \Delta t}{1 - z^{-1}} = \frac{1}{1 - z^{-1}} (K_p(1 - z^{-1}) + K_I \Delta t) = \frac{1}{1 - z^{-1}} (-K_p z^{-1} + (K_p + K_I \Delta t)).$$

Обозначим $a_1 = (K_p + K_I \Delta t)$, $a_2 = -K_p$. Разностное уравнение регулятора для k -го шага управления (момента времени t_k) будет иметь вид.

$$(2) \quad \begin{aligned} u(t_k) &= a_1 e(t_k) + a_2 e(t_k - \Delta t) + u(t_k - \Delta t) = \\ &= a_1 (r(t_k) - y(t_k)) + a_2 (r(t_k - \Delta t) - y(t_k - \Delta t)) + u(t_k - \Delta t). \end{aligned}$$

Таким образом, нейронная сеть для настройщика параметров ПИ-регулятора должна содержать пять входов: задание в текущий момент $r(t_k)$ и шаг назад $r(t_k - \Delta t)$, выход ОУ в текущий момент $y(t_k)$ и шаг назад $y(t_k - \Delta t)$ такт назад, и значение управляющего воздействия в предыдущий момент времени $u(t_k - \Delta t)$.

На выходном слое находится два нейрона, каждый из которых отвечает за вычисление соответствующего параметра регулятора K_p , K_I .

В работе [11] было обосновано, что число нейронов скрытого слоя должно удовлетворять следующему неравенству:

$N_{hid} \geq 2N+1$, где N – это число входов НС. Однако при использовании усреднения входных для нейронной сети величин для борьбы с шумом необходимо учитывать количество точек усреднения. Также для случая с ПИ-регулятором нейронная сеть имеет вход, на который подается выход ОУ такт назад. Таким образом, для трех точек усреднения и использования ПИ-регулятора количество нейронов в скрытом слое (N_{hid}) должно быть равно 14. Структура НС для решения рассматриваемой задачи примет следующий вид: **5-14-2**.

Обучение настройщика происходит двумя методами. При первом вызове настройщика происходит обучение на уже существующие параметры ПИ-регулятора скорости методом экстремального обучения [10]; далее происходит обучение методом обратного распространения ошибки, причем скорость обучения каждого отдельного нейрона выходного слоя нейронной сети определяет база правил. Также база правил определяет моменты, в которые необходимо производить обучение.

База правил в виде алгоритма представлена на рис. 2. Настройщик вызывается раз в Δt секунд. После выявления возмущения нейросетевой настройщик увеличивает K_p регулятора скорости. Далее в момент максимального отклонения частоты вращения от заданной величины (x_M) K_p уменьшается ($\eta_1^{(2)}$ – скорость обучения нейрона, ответственного за K_p), K_I – увеличивается ($\eta_2^{(2)}$ – скорость обучения нейрона, ответственного за K_I), также происходит расчет допустимой скорости возврата к уставке (Δu). Если скорость возврата частоты вращения к заданному значению превышает Δu , то нейросетевой настройщик приравняет K_p и K_I регулятора скорости к нулю. После завершения процесса компенсации возмущения коэффициенты регулятора возвращаются к начальным. r_{old} – последнее зафиксированное стационарное значение уставки по скорости.

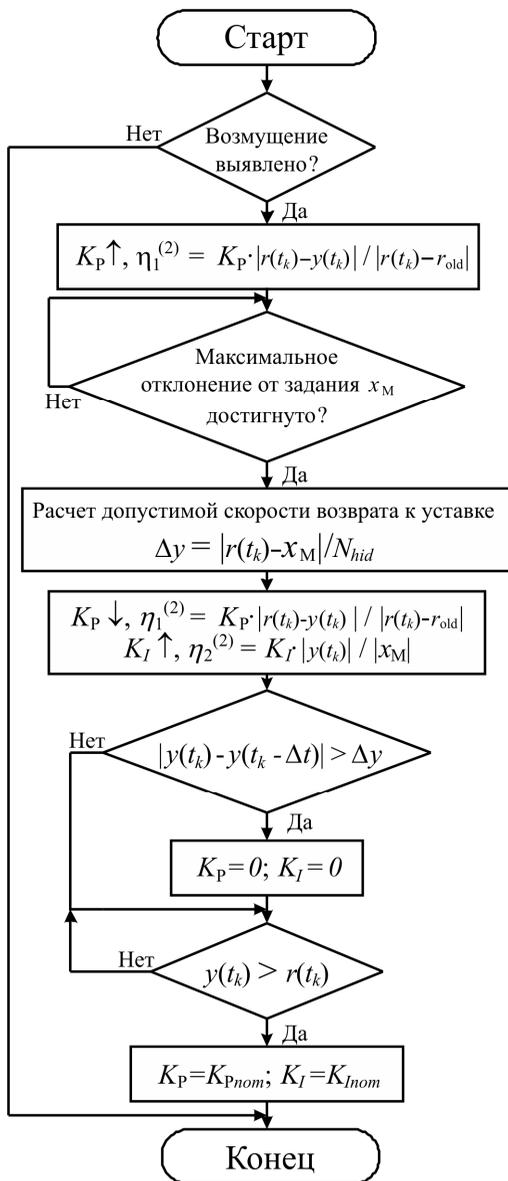


Рис. 2. Алгоритм работы базы правил нейросетевого настройщика для обработки возмущающих воздействий

4. Результаты экспериментов

Для проведения экспериментов по применению нейросетового настройщика на электроприводе постоянного тока использовался стенд NI ELVIS II с установленной платой Quanser DCMCT (рис. 3).



Рис. 3. Фотография экспериментального стенда

Система управления построена в программном пакете LabVIEW 2013 (рис. 4).

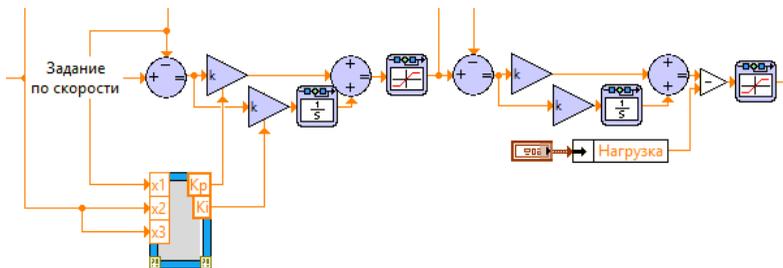


Рис. 4. Фрагмент системы управления электроприводом постоянного тока экспериментального стенда

Она представляет собой систему подчиненного регулирования, включающую в себя контур тока и контур скорости с линейными ПИ-регулятором тока и ПИ-регулятором скорости соответственно. Нейросетовой настройщик представляет собой программный код MatLab, помещенный в блок MathScript Node.

Эксперимент проводился следующим образом. При номинальных значениях параметров ПИ-регулятора скорости и ПИ-регулятора тока двигатель постоянного тока разгонялся до скорости 200 рад/с. Далее при тех же настройках подавалось ступенчатое возмущающее воздействие величиной 5В в канал управления. Нейросетевой настройщик выявлял момент возмущения и в соответствии с базой правил изменял параметры ПИ-регулятора скорости.

На рис. 5 приведено сравнение работы системы с нейросетевым настройщиком и без него для аналогичных условий эксперимента. Также показано изменение K_p и K_I регулятора скорости для случая с использованием нейросетевого настройщика.

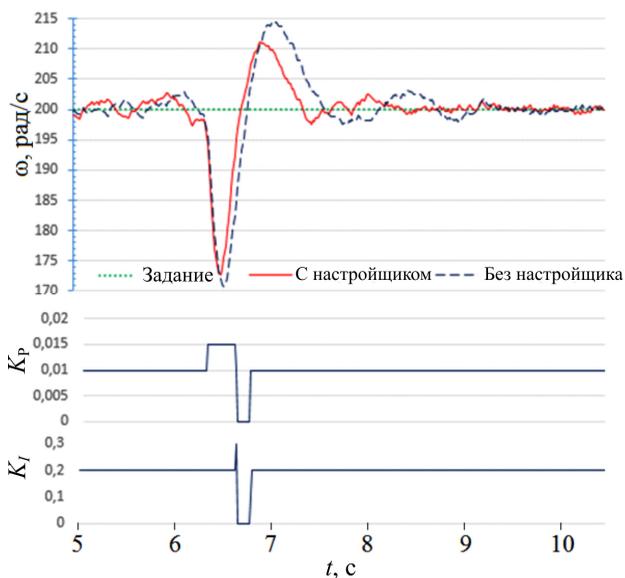


Рис. 5. Результаты эксперимента

Нейросетевой настройщик в режиме компенсации возмущающего воздействия позволил снизить максимальное отклонение от заданной скорости и время возврата к уставке на 8 и 30 % соответственно по сравнению с системой под управлением классического ПИ-регулятора без изменения его параметров.

5. Заключение

Применение нейросетевого настройщика для обработки возмущений позволяет улучшить работу электропривода постоянного тока в режиме компенсации возмущающих воздействий. Целью дальнейших исследований ставится совершенствование базы правил, применение настройщика для более сложных схем управления электроприводом.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-07-06092).

Литература

1. ЕРЕМЕНКО Ю.И., ГЛУЩЕНКО А.И., ПЕТРОВ В.А. *О нейросетевой адаптации параметров ПИИ-регулятора контура тока системы управления прокатной клетью в реальном времени* // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – № 3 (65). – С. 62–68.
2. *Снижение динамических нагрузок в универсальных клетях прокатного стана* / В.Р. ХРАМШИН [И ДР.] // Металлург. – 2015. – №. 4. – С. 41–47.
3. *Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки* / В.Р. ХРАМШИН [И ДР.] // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №. 2. – С. 69–77.
4. *Active disturbance rejection control of a heat integrated distillation column* / F. AL-KALBANI [ET AL.] // Proc. of 21st int. Conference on methods and models in automation and robotics. – IEEE, 2016. – P. 278–283.
5. *Adaptive controller for linear plant with parametric uncertainties, input delay and unknown disturbance* / A. PYRKIN [ET AL.] // IFAC Proceedings. – 2014. – Vol. 47.3. – P. 11294–11298.
6. ASTROM K.J., T. HAGGLUND *Advanced PID control*. – Research triangle park: ISA, 2006. – 460 p.
7. BEZRYADIN M.M., AND LOZGACHEV G.I. *Synthesis of modal controller with compensation of external disturbance for*

- object with parametric uncertainty on the criterion of maximum robustness* // Trudy SPIIRAN. – 2012. – Vol. 21. – P. 157–169.
8. BOBTSOV A.A., AND PYRKIN A.A. *Cancellation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with input delay* // International journal of adaptive control and signal processing. – 2012. – Vol. 26. – No. 4. – P. 302–315.
 9. GORBAN A.N., WUNSCH D. *The general approximation theorem*. Proceedings of the IJCNN. – Anchorage: IEEE, 1998. – P. 1271–1274.
 10. HUANG G.B., WANG D.H., LAN Y., *Extreme learning machines: a survey* // International journal of machine learning and cybernetics. – 2011. – Vol. 2. – No. 2. – P. 107–122.
 11. KŮRKOVÁ V. *KOLMOGOROV'S Theorem is relevant* // Neural computation. – 1991. – Vol. 3. – No. 4. – P. 617–622.
 12. LOZGACHEV G.I. *Synthesis of modal controllers based on a transfer system of a closed-loop system* // Avtom. telemekh. – 1995. – Vol. 5. – P. 49–55.
 13. *Output control algorithm for unstable plant with input delay and cancellation of unknown biased harmonic disturbance* / A. PYRKIN, A. SMYSHLYAEV, N. BEKIARIS-LIBERIS, M. KRSTIC // 9th IFAC Workshop on time delay system. – IFAC, 2010. – P. 1–6.
 14. SAXENA S., HOTE Y.V., *Simple approach to design PID controller via internal model control* // Arabian journal for science and engineering. – 2016. – Vol. 41. – No. 9. – P. 3473–3489.
 15. SHPILEVAYA O. YA. *Control systems with additive adjustment based on the velocity vector method* // Optoelectronics, instrumentation and data processing. – 2011. – Vol. 47. – P. 281–286.
 16. VISIOLI A. *Improving the load disturbance rejection performances of IMC-tuned PID controllers* // IFAC Proceedings volumes (15th ifac world congress). – 2002. – Vol. 35. – No. 1. – P. 295–300.
 17. VOSTRIKOV A.S., SHPILEVAYA O. YA, *Nonlinear control systems with fast adaptive algorithm* // Proceeding of the IASTED international conference on modelling, identification and control (MIC 2004). Switzerland, Grindelwald, 23–25 Febr. 2004. – P. 444–449.

ON NEURAL TUNER DEVELOPMENT TO IMPROVE DISTURBANCES ATTENUATION QUALITY SOLVING DC DRIVE CONTROL PROBLEM

Anton Glushchenko, Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Stary Oskol, Cand.Sc, Docent (Stary Oskol, Makarenko microdistrict, 42, (4725)45-12-17, strondutt@mail.ru).

Vladislav Petrov, Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Stary Oskol, postgraduate (79040882508@ya.ru).

Abstract: A PI-controller neural tuner application is considered in this research to solve control problem of DC drive functioning in disturbances rejection mode. Experiments are conducted to attenuate mentioned disturbances using a test bench by National Instruments. The disturbance is implemented as a step-like signal added to a control action signal, which is an armature current loop output. The neural tuner usage allows to reduce the maximal control error by 8 % and the transient time caused by the disturbance by 30 % comparing to a conventional control system with a speed PI-controller without parameters adjustment.

Keywords: DC drive, PI-controller, disturbances rejection, neural tuner.

ОБРАБОТКА ОБЪЕКТОВ ИНТЕРВАЛЬНОГО ТИПА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ SQL SERVER

**Сараев П.В.¹, Галкин А.В.²,
Мирошников А.И.³, Никольская А.А.⁴**
*(Липецкий государственный технический
университет, Липецк)*

Современные информационные системы имеют возможность для учета данных, содержащих неопределенность, в виде интервалов. Эта возможность может быть реализована в виде создания интервального типа данных в СУБД. Обработку объектов интервального типа удобно производить с помощью методов интервального анализа. В работе представлены разработанный интервальный тип в СУБД SQL Server и функции обработки объектов интервального типа.

Ключевые слова: интервальный анализ, системы управления базами данных, интервальный тип данных.

Развитие информационных технологий приводит к возможности накопления объемов данных о разнообразных процессах. Многие данные содержат погрешности или ошибки округления, учитываемые в виде интервальных значений. Неопределенность значений может быть представлена в интервальном виде, где значению параметра ставятся в соответствие нижняя и верхняя

¹ Павел Викторович Сараев, доктор технических наук, доцент (psraev@yandex.ru).

² Александр Васильевич Галкин, кандидат технических наук, доцент (avgalkin82@mail.ru).

³ Артем Игоревич Мирошников, ассистент (a.i.miroshnikov@yandex.ru).

⁴ Алина Александровна Никольская, студентка (nikol-pm13@mail.ru).

границы интервала, в котором оно достоверно находится. Учет неопределенности за счет использования вычислений над интервальными данными позволяет получать достоверную оценку возможных решений и вследствие этого принимать верные управленческие решения.

Таким образом, актуальной становится обработка интервальных данных с целью извлечения достоверной информации в системе управления базами данных, например, одной из самых распространенных SQL Server. В системах управления базами данных интервальный характер может учитываться за счет организации двух полей для описания, в одно из которых записывается минимальное значение (нижняя граница интервала), а в другое – максимальное (верхняя граница интервала). Однако данный способ не универсален для реализации агрегирующих функций, таким образом, лучшим вариантом является создание пользовательского типа данных в самой СУБД.

Интервальная алгебра – математическая структура, которая для вещественных интервалов определяет операции, аналогичные арифметическим.

Над интервалами определены следующие основные операции [5]:

$$(1) [a] + [b] = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}] \text{ – сложение интервалов,}$$

$$(2) [a] - [b] = [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}] \text{ – разность интервалов,}$$

$$(3) [a][b] = [\min\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}\}, \max\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}\}] \text{ – произведение интервалов,}$$

$$(4) \frac{[a]}{[b]} = [a] \left[\frac{1}{\bar{b}}, \frac{1}{\underline{b}} \right], \quad b \neq 0 \text{ – деление интервалов.}$$

Также существуют два метода нахождения интервального расширения: естественное и центрированное, представленные ниже:

$$(5) \mathbf{f}_{\text{nat}}([x]) = \min(f(x)|x \in [x]); \max(f(x)|x \in [x])$$

$$(6) \mathbf{f}_{mv}([x]) = f(\text{mid}[x]) + \mathbf{f}'_{\text{nat}}([x])([x] - \text{mid}[x]),$$

где $\text{mid}[x] = \frac{x + \bar{x}}{2}$ – середина интервала.

Для создания пользовательского типа данных был выбран вариант с использованием среды .NET с реализацией на языке C# в виде сборки к SQL Server [1–3].

Конструктор класса, принимающий нижнюю и верхнюю округленные границы интервала, представлен ниже [4].

```
public iInterval(double down, double up): this() {  
  
    if (down >= up)  
    {  
        this = Null;  
        isNull = true;  
    }  
    else  
    {  
        isNull = false;  
        this.down = Math.Round(down, 14,  
MidpointRounding.ToEven);  
        this.up = Math.Round(up, 14,  
MidpointRounding.AwayFromZero);  
    }  
}
```

В табл. 1 представлен способ представления интервалов в базе данных.

Таблица 1. Таблица Intervals с интервальным типом данных

id	interval
1	0,5;2,0
2	1,3;3,5
3	0,3;4,1

Над созданным интервальным типом данных был реализован расчет интервальных расширений функций, представленных в табл. 2.

Таблица 2. Функции над интервалами

Класс	Операция
IPOC(iInterval Value, SqlDouble a)	Расчет интервального расширения функции a^x
IEXP(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции e^x
ILOG(iInterval Value, SqlDouble a)	Расчет интервального расширения функции $\log_a x$
IKV(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции x^2
ISQRT(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции \sqrt{x}
ISIN(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции $\sin(x)$
ICOS(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции $\cos(x)$
ITAN(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции $\operatorname{tg}(x)$
ICOTAN(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции $\operatorname{ctg}(x)$
IARCSIN(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции $\arcsin(x)$
IARCCOS(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции $\arccos(x)$
IARCTAN(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции $\operatorname{arctg}(x)$
IARCCOTAN(iInterval Value)	Расчет интервального расширения функции $\operatorname{arcctg}(x)$

В качестве примера можно привести реализацию экспоненциальной функции:

```
public class IEXP {
    public static iInterval NEXP(iInterval Value)
    {
        iInterval n_exp = new iInterval();
        n_exp.down = Math.Exp(Value.down);
    }
}
```

```
n_exp.up = Math.Exp(Value.up);
return n_exp;
}
public static iInterval CEXP(iInterval Value)
{
    iInterval c_exp = new iInterval();
    iInterval pr_exp = new iInterval();
    pr_exp = NEXP(Value);
    c_exp = ISUUM.SUUM((IMMULT.MMULT(pr_exp,
(IRAZN.RAZN(Value, IMID.MID(Value))))),
Math.Exp((double)IMID.MID(Value)));
    return c_exp;
}
public static iInterval EXP(iInterval Value)
{
    iInterval n_exp = new iInterval();
    iInterval c_exp = new iInterval();
    iInterval exp = new iInterval();
    n_exp = NEXP(Value);
    c_exp = CEXP(Value);
    if (n_exp.down > c_exp.down)
        exp.down = n_exp.down;
    else
        exp.down = c_exp.down;
    if (n_exp.up < c_exp.up)
        exp.up = n_exp.up;
    else
        exp.up = c_exp.up;
    return exp;
}
}
```

Ниже приведен запрос для вывода результата интервального расширения экспоненциальной функции интервалов из табл. 1.

```
SELECT dbo.IEXP(interval) FROM Intervals.
```

Результат расчета данного расширения представлен в табл. 3.

Таблица 3. Интервальное расширение функции e^x

id	interval e^x
1	1,64872127;7,38905609
2	3,66929667;33,11545196
3	1,34985881;60,34028759

Над созданным интервальным типом данных были реализованы операции, представленные в табл. 4.

Таблица 4. Операции над интервалами

Класс	Операция
ISUM	Сложение всех интервалов
IMULT	Умножение всех интервалов
ISUMA(iInterval Value1, iInterval Value2)	Сложение двух интервалов
IVCH(iInterval Value1, iInterval Value2)	Разность двух интервалов
IMMULT(iInterval Value1, iInterval Value2)	Умножение двух интервалов
IDDEL(iInterval Value1, iInterval Value2)	Деление двух интервалов
ISUUM(iInterval Value1, SqlDouble a)	Прибавление числа к интервалу
IRAZN(iInterval Value1, SqlDouble a)	Вычитание числа из интервала
ISCALAR_MULT(iInterval Value1, SqlDouble a)	Умножение интервала на число

Можно привести пример реализации такой операции, как сложение всех интервалов.

```
public struct ISUM
{
    private double d, u;

    public void Init()
    {
```

```
d = 0.0;
u = 0.0;
}
public void Accumulate(iInterval Value)
{
    d += Value.down;
    u += Value.up;
}
public void Merge(ISUM Group)
{
    d += Group.d;
    u += Group.u;
}
public iInterval Terminate()
{
    return new iInterval(d, u);
}
}
```

Ниже приведен запрос для расчета суммы интервалов из табл. 3.

```
SELECT dbo.ISUM (interval) FROM Intervals.
```

Результат расчета данной операции представлен в табл. 5.

Таблица 5. Функция сложения интервалов

id	interval
1	6,66787675; 100,84479564

Таким образом, при помощи созданной библиотеки классов становится возможна обработка интервальных типов для получения достоверных знаний и работа с функциями, где аргументы принимают интервальные значения, ничем не отличается от работы с обыкновенными функциями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта 16-47-480929-р_а.

Литература

1. ГАЛКИН А.В., МИРОШНИКОВ А.И., ПОГОДАЕВ А.К. *Разработка интервального типа данных и операций над ним в системе MS SQL Server* // Системы управления и информационные технологии. – 2017. – № 1(67). – С. 48–51.
2. МИРОШНИКОВ А.И., НИКОЛЬСКАЯ А.А. *Исследование методов организации интервальных баз данных и выполнения интервальных запросов* // Современные проблемы информатизации, 2017. – С. 273–278.
3. ПЕТКОВИЧ Д. *Microsoft SQL Server 2012. Руководство для начинающих* / пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 816 с.
4. ТРОЕЛСЕН Э. *Язык программирования C#5.0 и платформа .NET 4.5*. – М.: Вильямс, 2013. – 1310 с.
5. ШАРЫЙ С.П. *Конечномерный интервальный анализ* [Электронный ресурс] / Институт вычислительных технологий СО РАН. – Новосибирск, 2016. – 617 с. – URL: <http://www.nsc.ru/interval>.

OBJECT PROCESSING INTERVAL TYPE IN THE DATABASE MANAGEMENT SYSTEM SQL SERVER

Saraev Pavel Viktorovich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, doctor of technical Sciences, associate Professor (psraev@yandex.ru).

Galkin Alexander Vasil'evich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, candidate of technical Sciences, associate Professor (avgalkin82@mail.ru).

Miroshnikov Artem Igorevich, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, assistant (a.i.miroshnikov@yandex.ru).

Nikol'skaya Alina Aleksandrovna, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the student (nikol-pm13@mail.ru).

Abstract: Modern information systems have the ability to account for data that contains uncertainty in the form of intervals. This can be implemented in the form of the creation of interval data type in the DBMS. Processing objects of interval type are easy to make by using methods of interval analysis. The paper presents the designed interval type in SQL Server and processing functions of the objects of interval type.

Keywords: interval analysis, database management system, the interval data type.

УДК 519.67
ББК 22.18

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФУНКЦИЙ АКТИВАЦИИ В СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДУАЛЬНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Сараев П.В.¹, Полозова Ю.Е.²
(Липецкий государственный технический университет, Липецк)

В работе исследована возможность применения различных функций активации при обучении дуальнопараметрических нейросетевых моделей. Предложен алгоритм структурной идентификации дуальнопараметрической нейронной сети с одним скрытым слоем. Приведена краткая теоретическая справка, представляющая собой обзор предыдущих исследований. Представлены результаты численного моделирования, сделаны выводы о целесообразности применения предложенного алгоритма.

Ключевые слова: дуальнопараметрическая нейронная сеть, интервальное нейросетевое прогнозирование, структурная идентификация.

1. Введение

Дуальнопараметрическая нейросетевая (ДНС) модель представляет собой частный случай интервальной нейронной сети с параметрами (весами) двух типов: вещественными и интервальными. Алгоритм обучения вещественных весов в такой модели представляет собой интервальный аналог метода обратного распространения ошибки. В связи с этим возникает вопрос

¹ Павел Викторович Сараев, доктор технических наук, доцент (psaraev@yandex.ru).

² Юлия Евгеньевна Полозова, аспирантка (julipolozova@yandex.ru).

о возможности использования разных функций активации (ФА) при обучении ДНС.

В данной работе предлагается алгоритм структурной идентификации ДНС, основанный на подборе оптимального числа нейронов скрытого слоя с разными ФА.

2. Теоретическая справка

Дуальнопараметрическая нейросетевая модель с одним интервальным выходом содержит n входных интервальных нейронов и m скрытых слоев. Веса нейронов всех слоев от первого до $m - 1$ представляют собой вещественные числа. Веса нейронов в скрытом слое m задаются интервальными значениями. Обучение ДНС производится в два этапа [1].

1. Обучение интервальной нейронной сети (ИНС) с вещественными весами. Полученные в результате обучения параметры используются на втором этапе для инициализации весов нейронов всех скрытых слоев, кроме последнего.

2. Обучение только последнего, интервального, слоя нейронов. При этом все предыдущие скрытые слои фиксируются с весами нейронов, полученными на первом этапе алгоритма.

Обучение модели на первом этапе производится методом обратного распространения ошибки для случая интервальнозначных входов и выходов [3–7]. При этом ошибка обучения для модели с одним выходом определяется квадратичным функционалом качества:

$$(1) \quad J(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k Q_i(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \left\{ \left(y_i(w) - \underline{\tilde{y}}_i \right)^2 + \left(\overline{y_i(w)} - \overline{\tilde{y}}_i \right)^2 \right\},$$

где k – число примеров обучающего множества, w – вектор весов, $Q_i(w)$ – значение ошибки обучения на i -м примере обучающего множества; $y_i(w)$ – нижняя граница выходного интервала ИНС на i -м примере; $\underline{\tilde{y}}_i$ – нижняя граница выходного интервала указания учителя на i -м примере; $\overline{y_i(w)}$ – верхняя граница выходного интервала ИНС на i -м примере; $\overline{\tilde{y}}_i$ – верхняя граница выходного интервала указания учителя на i -м примере.

Границы выходного интервала i -го нейрона l -го слоя вычисляются по формулам [6]:

$$(2) \quad \underline{y}^{(l,i)} = \sigma(\underline{net}^{(l,i)}) = \sigma\left(\sum_{j=0, w_j \geq 0}^{N_{l-1}} w_j^{(l,i)} \underline{y}^{(l-1,j)} + \sum_{j=0, w_j < 0}^{N_{l-1}} w_j^{(l,i)} \overline{y}^{(l-1,j)}\right),$$

$$(3) \quad \overline{y}^{(l,i)} = \sigma(\overline{net}^{(l,i)}) = \sigma\left(\sum_{j=0, w_j \geq 0}^{N_{l-1}} w_j^{(l,i)} \overline{y}^{(l-1,j)} + \sum_{j=0, w_j < 0}^{N_{l-1}} w_j^{(l,i)} \underline{y}^{(l-1,j)}\right),$$

где $\underline{y}^{(l,i)}$ – нижняя граница выходного интервала i -го нейрона l -го слоя; $\sigma(\cdot)$ – функция активации нейрона скрытого слоя; $\underline{net}^{(l,i)}$ – нижняя граница уровня активации i -го нейрона l -го слоя; N_{l-1} – число нейронов слоя $l-1$; $w_j^{(l,i)}$ – j -й вес i -го нейрона l -го слоя; $\underline{y}^{(l-1,j)}$ – нижняя граница выхода j -го нейрона слоя $l-1$; $\overline{y}^{(l-1,j)}$ – верхняя граница выхода j -го нейрона слоя $l-1$; $\overline{y}^{(l,i)}$ – верхняя граница выходного интервала i -го нейрона l -го слоя; $\overline{net}^{(l,i)}$ – верхняя граница уровня активации i -го нейрона l -го слоя.

Градиент функционала качества обучения интервальной нейросетевой модели представляется выражением

$$(4) \quad \frac{\partial Q(w)}{\partial w_j^{(l,i)}} = \begin{cases} \underline{s}^{(l,i)} \sigma'_{net}(\underline{net}^{(l,i)}) \underline{y}^{(l-1,j)} + \overline{s}^{(l,i)} \sigma'_{net}(\overline{net}^{(l,i)}) \overline{y}^{(l-1,j)}, & \text{если } w_j^{(l,i)} \geq 0, \\ \underline{s}^{(l,i)} \sigma'_{net}(\underline{net}^{(l,i)}) \overline{y}^{(l-1,j)} + \overline{s}^{(l,i)} \sigma'_{net}(\overline{net}^{(l,i)}) \underline{y}^{(l-1,j)}, & \text{если } w_j^{(l,i)} < 0, \end{cases}$$

где $\underline{s}^{(l,i)}$, $\overline{s}^{(l,i)}$ – нижняя и верхняя границы множителя, определяемого с помощью рекуррентной процедуры

$$(5) \quad \underline{s}^{(l,i)} = \left(\sum_{j=1, w_j \geq 0}^{N_{m+1}} \underline{s}^{(l+1,j)} \sigma'_{net}(\underline{net}^{(l+1,j)}) w_i^{(l+1,j)} + \sum_{j=1, w_j < 0}^{N_{m+1}} \overline{s}^{(l+1,j)} \sigma'_{net}(\overline{net}^{(l+1,j)}) w_i^{(l+1,j)} \right),$$

$$(6) \quad \overline{s^{(l,i)}} = \left(\sum_{j=1, w_j \geq 0}^{N_{m+1}} \overline{s^{(l+1,j)}} \sigma'_{net} \left(\overline{net^{(l+1,j)}} \right) w_i^{(l+1,j)} + \sum_{j=1, w_j < 0}^{N_{m+1}} \underline{s^{(l+1,j)}} \sigma'_{net} \left(\underline{net^{(l+1,j)}} \right) w_i^{(l+1,j)} \right)$$

с начальным условием $\underline{s^{(L,1)}} = \underline{y(w)} - \underline{\tilde{y}}$, $\overline{s^{(L,1)}} = \overline{y(w)} - \overline{\tilde{y}}$. Здесь L – количество слоев нейросетевой модели.

Обучение модели на втором этапе производится с помощью интервального адаптивного алгоритма глобальной оптимизации функций, основанного на бисекции вектора весов [2]. При этом ошибка обучения для модели с интервальными весами и одним выходом определяется функционалом качества:

$$(7) \quad J([w]) = \sum_{i=1}^k Q_i([w]) = \sum_{i=1}^k p_i b_i,$$

$$(8) \quad b_i = [b_{i1} \quad b_{i2}]^T = \left[\underline{\tilde{y}}_i - \underline{y}_i([w]) \quad \overline{y}_i([w]) - \overline{\tilde{y}}_i \right]^T,$$

$$(9) \quad p_i = [p_{i1} \quad p_{i2}], \quad p_{iq} = \begin{cases} 1, & b_{iq} \geq 0 \\ -b_{iq} / N, & b_{iq} < 0; \end{cases} \quad q = \overline{1,2}.$$

Здесь k – число примеров обучающего множества; $[w]$ – интервальный вектор весов; $Q_i([w])$ – значение ошибки обучения на i -м примере обучающего множества; p_i – вектор-строка весовых коэффициентов для отклонения границ интервала выхода сети от границ интервала указания учителя на i -м примере обучающего множества; b_i – вектор отклонений границ интервала выхода сети от указания учителя на i -м примере; $\underline{\tilde{y}}_i$ – нижняя граница интервала указания учителя на i -м примере; $\underline{y}_i([w])$ – нижняя граница интервала выхода сети на i -м примере; $\overline{y}_i([w])$ – верхняя граница интервала выхода сети на i -м примере; $\overline{\tilde{y}}_i$ – верхняя граница интервала указания учителя на i -м примере; p_{iq} – q -й элемент вектора-строки p_i ; b_{iq} – q -й элемент вектора b_i ; q – номер элемента вектора; N – уровень толерантности, показывающий порядок отклонения границы

интервала, который признается допустимым (например, 0,1, 0,01, 0,001).

3. Алгоритм структурной идентификации ДНС с разными ФА

В данной работе задача структурной идентификации состоит в нахождении оптимального числа скрытых нейронов и их ФА для модели ДНС с одним скрытым слоем. Предлагается использовать следующий алгоритм подбора оптимального числа нейронов скрытого слоя.

Шаг 1. Производится обучение интервальной нейросетевой модели первого этапа с вещественными весами. Задается L – максимально возможное число нейронов скрытого слоя. Производится последовательно наращивание структуры нейросетевой модели путем последовательного добавления нейронов в скрытый слой при уменьшении ошибки обучения.

Шаг 1а. В скрытый слой добавляется единственный нейрон. Выполняется цикл из K итераций, соответствующих количеству разных ФА. На каждой итерации производится серия из N обучений интервальной нейросетевой модели первого этапа с вещественными весами. Выбирается наименьшая из ошибок обучения, полученных в серии, соответствующие ей веса нейронов скрытого слоя и ФА.

Шаги 1б и последующие. В скрытый слой добавляется еще один нейрон. Выполняется цикл из K итераций, соответствующих количеству разных ФА. На каждой итерации производится серия из N обучений интервальной нейросетевой модели первого этапа с вещественными весами. Выбирается наименьшая из ошибок обучения, полученных в серии, соответствующие ей веса нейронов скрытого слоя и ФА. Если ошибка обучения, полученная на текущем шаге, оказывается меньше ошибки обучения, полученной на предыдущем шаге, то выполняется переход на следующий шаг цикла. Иначе количество нейронов скрытого слоя устанавливается равным числу нейронов предыдущего шага, а значения весов нейронов скрытого слоя устанавливаются равными соответствующим значениям, полученным на преды-

дущем шаге, и выполняется переход на шаг 2. Цикл повторяется до тех пор, пока количество нейронов в скрытом слое не достигнет максимально возможного числа L или не произойдет переход на шаг 2.

Шаг 2. Количество нейронов скрытого слоя устанавливается равным числу нейронов, полученному на шаге 1. Веса нейронов скрытого слоя инициализируются значениями, полученными на шаге 1. ФА для каждого нейрона скрытого слоя устанавливаются равными найденным в ходе обучения. Производится обучение выходного слоя нейронов интервальной нейросетевой модели второго этапа.

4. Результаты численного моделирования

Для проведения экспериментов рассматриваются два набора исходных данных, включающие 30 интервальных значений. По исходным данным производится построение прогноза на 5 значений вперед. Уровень толерантности $N = 0,00001$. Результаты эксперимента приведены в таблице и на рис. 1, 2.

Результаты эксперимента

	Номер эксперимента	
	1	2
Число входных нейронов	3	5
Число нейронов скрытого слоя	3	3
ФА нейронов скрытого слоя	$\sigma(net) = \arctg(net)$, $\sigma(net) = \arctg(net)$, $\sigma(net) = 1 / (1 + e^{-net})$	$\sigma(net) = 1 / (1 + e^{-net})$, $\sigma(net) = 1 / (1 + e^{-net})$, $\sigma(net) = \arctg(net)$
Время обучения, с	1378	1194
Ошибка обучения	1,31	5,48
Среднее относительное отклонение границ интервалов прогнозных значений от фактических	0,20	3,79

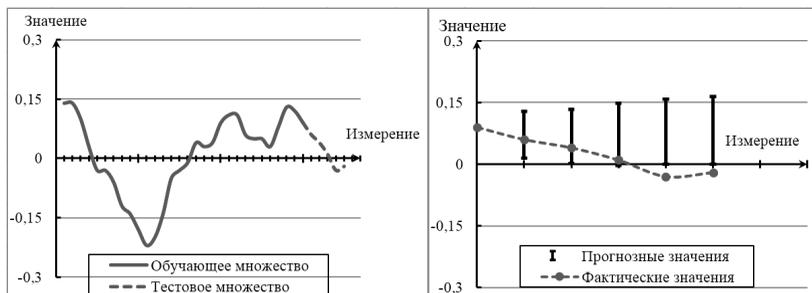


Рис. 1. Результаты прогнозирования (опыт 1)

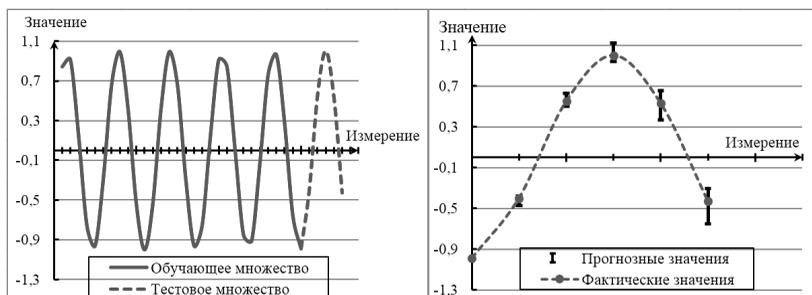


Рис. 2. Результаты прогнозирования (опыт 2)

Следует отметить, что результат, полученный в опыте 2, соответствуют аналогичному результату, полученному с использованием только сигмоидной логистической ФА нейронов скрытого слоя. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм не ухудшает полученные ранее результаты.

Результат, полученный в опыте 1, демонстрирует, что требование получения гарантированных оценок результатов вычислений выполняется только в трех значениях из пяти, что подтверждается величиной ошибки обучения. Частично полученный результат можно объяснить малым объемом обучающего множества, недостаточным для аппроксимации рассматриваемой зависимости.

5. Выводы

В ходе исследования возможности использования разных ФА при обучении ДНС рассмотрен предложенный в работе алгоритм структурной идентификации ДНС. По результатам проведенных экспериментов можно заключить, что предложенный алгоритм не ухудшает результаты, полученные в предыдущих исследованиях. Таким образом, представляется целесообразным применение предложенного алгоритма при прогнозировании на основе ДНС.

Литература

1. ПОЛОЗОВА Ю.Е. *Идентификация дуальнопараметрических нейросетевых моделей* // Вести ВУЗОВ Черномозья. – 2017. – № 1. – С. 73–80.
2. ШАРЫЙ С.П. *Рандомизированные алгоритмы в интервальной глобальной оптимизации* // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2008. – Т. 11, № 4. – С. 457–474.
3. AK R., VITELLI V., ZIO E. *An Interval-Valued Neural Network Approach for Uncertainty Quantification in Short-Term Wind Speed Prediction* // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2015. – Vol. 26. – No. 11. – P. 2787–2800.
4. BELOHLAVEK R. *Backpropagation for interval patterns* // Neural Network World. – 1997. – Vol. 7. – No. 3. – P. 335–346.
5. *Genetic interval neural networks for granular data regression* / M. Ciminoa, B. Lazzerinia, F. Marcellonia, W. Pedryczb // Information Sciences. – 2014. – Vol. 257. – P. 313–330.
6. KIM H.J., RYU T.-W. *Time series prediction using an interval arithmetic FIR network* // Neural Information Processing – Letters and Reviews. – 2005. – Vol. 8. – No. 3. – P. 39–47.
7. YANG D., LI Z., WU W. *Extreme learning machine for interval neural networks* // Neural Computing and Applications. – 2016. – 27(1). – P. 3–8.

STRUCTURAL IDENTIFICATION OF DUAL-PARAMETRIC NEURAL NETWORKS

Pavel Saraev, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Doctor of Science, assistant professor (psaraev@yandex.ru).

Yuliya Polozova, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, post-graduate (julipolozova@yandex.ru).

Abstract: The possibility of using various activation functions in the learning algorithm of dual-parametric neural network models has been studied. The algorithm for structural identification of a dual-parametric neural network with a single hidden layer is proposed. A brief theoretical note is presented, which is a review of previous studies. The results of numerical modeling are presented, conclusions about the expediency of applying the proposed algorithm are done.

Keywords: dual-parametric neural network, interval neural network prediction, structural identification.

УДК 004.056
ББК 32.97

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ УГРОЗ СИСТЕМЫ «УМНЫЙ ДОМ» И ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПОДХОДОВ К ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Бондарев С.Э.¹

(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)

Статья посвящена исследованию возможных внутренних угроз, возникающих вследствие эксплуатации автоматизированной системы здания на примере «умного дома» и предложению способов их предотвращения. Такая система несёт в себе много достоинств, но в силу увеличения количества используемых технологий растёт и её сложность, что приводит к росту возможных ошибок, которые, в свою очередь, могут приносить ущерб от незначительного до критического. Эти угрозы несут критический характер как для пользователя и самого здания, в котором данная система функционирует, так и для близлежащей территории. Одним из следствий таких угроз является передача некорректных данных между датчиками и компонентами системы. В статье будут предложены способы фильтрации передаваемой компонентами информации, которые исключат данную уязвимость.

Ключевые слова: умный дом, система управления, информационная безопасность.

1. Введение

На данный момент системы автоматизированного управления и мониторинга здания/помещения широко распространены не только в квартирах и жилых домах, но и в государственных

¹ Сергей Эдуардович Бондарев, аспирант (b-sergi@mail.ru).

учреждениях, торговых центрах, больницах, критически важных объектах. С ростом используемых технологий при создании такой системы увеличиваются и возможные угрозы, которые могут возникать как искусственно, извне, так и по вине самой системы или пользователя.

Умный дом – это комплекс систем, интегрированных в единое информационное пространство, обеспечивающий максимальную безопасность людей и имущества, поддерживающий комфортные условия труда и отдыха, а также позволяющий увеличить эффективность функционирования служб при одновременном снижении эксплуатационных расходов [1].

При помощи массива заранее выработанных алгоритмов – сценариев осуществляется функционирование такой системы. Главной особенностью системы является компиляция устройств и технологий в единый управляемый комплекс.

Умные дома включают в себя много неоднородных технологий, работу которых необходимо согласовать друг с другом во избежание конфликтов между ними. Очевидно, что данные конфликты могут носить критический характер как для пользователя, так и для близлежащей территории. Однако в отличие от скорости внедрения подобных систем мало внимания уделено изучению вопроса безопасности, в частности защиты системы от самой себя. В рамках данной статьи будут предложены модель внутренних угроз и способы контроля передаваемых в системе параметров.

2. Концепции создания «умного дома»

На момент написания данной статьи существует три различных подхода в управлении системы «умный дом» [1]:

- ◆ централизованное;
- ◆ децентрализованное;
- ◆ системы, работающие по радиоканалу в силовой проводке (X-10).

При централизованной структуре управления система имеет центральный контроллер, который управляет исполнительными устройствами.

При децентрализованном управлении в системе связь между устройствами осуществляется через шину протокола, независимо передатчик это или приёмник. Такая структура работает обособленно от центрального компьютера, легко масштабируется и универсальна. За счёт отсутствия единой точки отказа система является надёжной.

X10 – это протокол обмена управляющими сигналами-командами в силовой электропроводке для электронных модулей. Отправляемые с прибора по сети X10 сообщения имеют два параметра – адрес устройства назначения и команда. Все подключённые к такой сети приборы получают это сообщение, декодируют его, и если адрес получателя совпал со значением адреса в сообщении, то устройство выполняет команду.

3. Модель локальных угроз безопасности

Модель внешних угроз безопасности в данной статье не рассматривается. Для их построения достаточно обратиться, например, к ГОСТ Р 51275-2006 [2] или ISO 17799 [3].

На рис. 1 предлагается универсальная модель внутренних угроз безопасности, которая распространяется на каждую структуру системы «умный дом», описанных выше.



Рис. 1. Модель внутренних угроз безопасности «умного дома»

Подобные угрозы, очевидно, реализуются вследствие непредвиденных факторов, при которых компоненты системы генерируют неверные параметры, поэтому она неправильно реагирует, за исключением умышленного вредоносного воздействия пользователей системы.

4. Подходы к контролю параметров

Для предотвращения неадекватной реакции системы предлагаются следующие подходы:

- фильтрация исходящих параметров непосредственно на сенсоре;
- централизованный мониторинг и фильтрация передаваемых по сети параметров;
- мониторинг осуществляется на центральном контроллере/компьютере;
- выделенный контролирующий контроллер

Фильтрация исходящих параметров на сенсоре заключается в установке дополнительного контроллера в функциональном блоке сенсора (рис. 2).

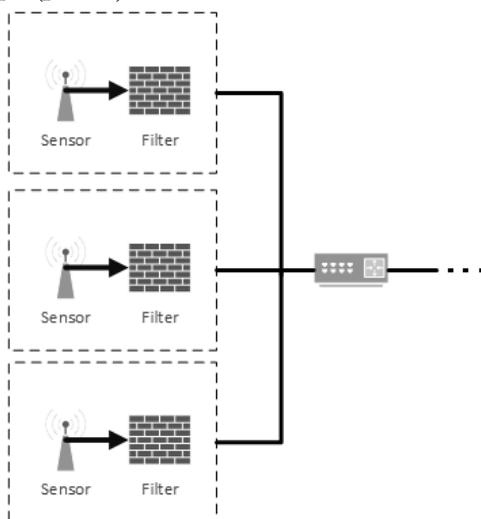


Рис. 2. Структурная схема фильтрации данных с установкой фильтра на сенсоре

Этот элемент должен содержать данные допустимых значений того или иного параметра, например температуры помещения. На входе контроллер получает данные с сенсора, сравнивает их с набором допустимых значений и, если проверка прошла успешно, отправляет исходные данные дальше по сети. В случае когда входные параметры не попадают в область допустимых значений, фиксируется аномалия и информация об этом сообщается либо центральному контроллеру/компьютеру, либо остальным модулям системы «умного дома», и данный датчик исключается из системы до устранения неполадки.

Достоинства такого подхода состоят в следующем:

- ◆ предотвращение исполнения неверного сценария на этапе отправки данных в сеть;
- ◆ уменьшение нагрузки на центральный узел;
- ◆ автоматическое отключение датчика при отправке неадекватных параметров;
- ◆ легко реализуется при любой схеме управления системы «умного дома»;
- ◆ нет единой точки отказа.

К недостаткам предложенного подхода можно отнести следующие:

- ◆ стоимость реализации подхода прямо зависит от количества используемых в системе модулей;
- ◆ на некоторые датчики достаточно проблематична установка дополнительных контроллеров;
- ◆ снижение скорости передачи данных в сети.

На рис. 3 предложена реализация мониторинга и фильтрации на центральном сервере в качестве дополнительного программного модуля. При реализации предлагаемой концепции датчики не нуждаются в дополнительной настройке, достаточно установить специальное программное обеспечение, которое будет осуществлять первичный мониторинг входящей информации от сенсоров.

Программа, так же как и в предыдущем подходе, осуществляет сравнение входных данных со списком допустимых значений. Если полученные данные не попадают в диапазон допустимых значений, программа фиксирует нарушение и сообщает централь-

ному серверу об этом. В отличие от поэлементной фильтрации сам компонент мониторинга не принимает решение – отключить неисправный компонент или нет, вместо этого он оповещает центральный контроллер и оставляет решение за ним.

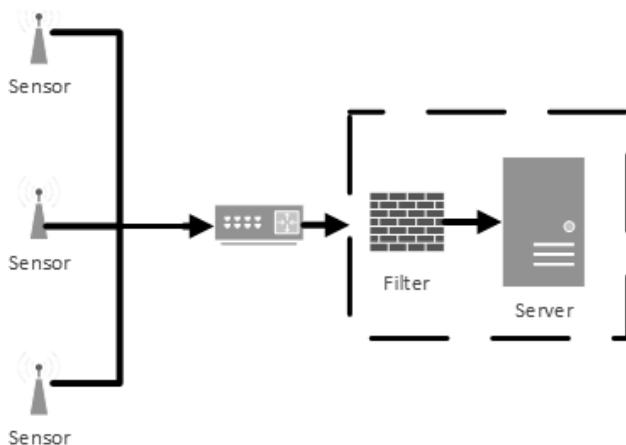


Рис. 3. Структурная схема централизованной программной фильтрации данных на главном сервере

Ниже приведены достоинства этой концепции:

- ◆ стоимость реализации не зависит от сложности системы;
- ◆ простота установки и настройки компонента мониторинга;
- ◆ своевременная и необходимая реакция системы на недостоверные данные, полученные от сенсоров.

Недостатки:

- ◆ единая точка отказа. В случае отказа центрального контроллера, даже если система имеет возможность работать автономно без него, предлагаемый программный модуль не будет функционировать;
- ◆ отсутствие универсальности. Концепция не подходит для децентрализованной архитектуры системы «умного дома».

На рис. 4 предложен аппаратный способ реализации централизованной фильтрации и мониторинга передаваемых в сети параметров. Очевидно, отличие от предыдущего подхода заключается в способе реализации: вместо специального про-

граммного обеспечения предлагается использовать выделенный контроллер или компьютер, который будет осуществлять централизованный контроль. Информация от сенсоров, прежде чем достигнуть центрального сервера, попадает на контролирующее устройство, затем проверяется на адекватность и, если данные успешно проходят проверку, без изменения поступают на центральный контроллер, иначе к данным добавляется информация о недопустимом значении, оставляя право соответствующего реагирования за центральным контроллером.

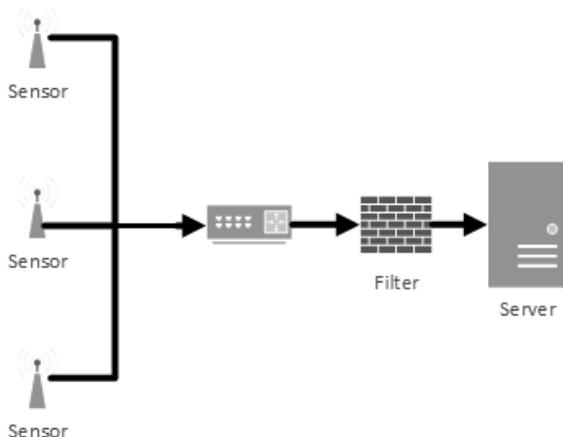


Рис. 4. Структурная схема централизованной выделенной аппаратной фильтрации данных

Централизованный подход к контролю данных возможно использовать только для централизованной архитектуры системы «умного дома». Ниже приведены достоинства выделенной аппаратной фильтрации данных:

- ◆ контролирующий модуль может выполнять роль центрального контроллера, если он вышел из строя;
- ◆ снижена нагрузка на центральный контроллер за счёт передачи функций контроля на отдельное устройство;
- ◆ низкая нагрузка на сеть;
- ◆ стоимость не зависит от сложности системы;
- ◆ многофункциональность.

Недостатки:

- ◆ дороже, чем программный модуль для центрального контроллера;
- ◆ отсутствие универсальности. Концепция не подходит для децентрализованной архитектуры системы «умного дома».

Поэлементный контроль, очевидно, хорошо подходит для небольших «умных домов», где зачастую используется децентрализованная архитектура. Централизованный подход напротив, хорошо подходит для более сложных систем за счёт независимости работы и настройки от количества используемых системой узлов.

5. Заключение

Предложенные подходы могут обезопасить систему «умного дома» от ошибок, связанных с обработкой неадекватных данных, отправляемых датчиками.

Таким образом, внутренние угрозы, возможные вследствие эксплуатации «умного дома», могут быть предотвращены за счёт использования специальных программных или аппаратных компонентов проверки адекватности передаваемых сенсорами параметров.

Литература

1. Ву Т.З. *Анализ систем автоматизированного управления умным домом* // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1, № 4. – С. 28–31.
2. *ГОСТ Р 51275-2006* [Электронный ресурс]. – URL: <http://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=121176> (дата обращения: 18.05.2017).
3. *ГОСТ Р ИСО/МЭК 17799-2005* [Электронный ресурс]. – URL: <http://prism.su/books/GOST-17799-2005.pdf>.

**DETERMINATION OF THE INTERNAL THREATS
OF THE "SMART HOUSE" SYSTEM AND THE PROPOSAL
OF APPROACHES TO PREVENTING THEIR
IMPLEMENTATION**

Sergey Bondarev, Perm National Research Polytechnic University,
Perm, post graduate student (b-sergi@mail.ru).

Abstract: The article is devoted to the investigation of possible internal threats arising from the operation of the automated building system using the example of a "smart home" and suggesting ways to prevent them. Such a system has many advantages, but due to the increase in the number of used technologies, its complexity also grows, which leads to the growth of possible errors, which in turn can cause damage from insignificant to critical. These threats are critical for both the user and the building itself, in which the system functions, and for the surrounding area. One consequence of such threats is the transmission of incorrect data between sensors and system components. The article will propose methods of filtering transmitted by information components that will exclude this vulnerability

Keywords: smart house, management system, information security.

УДК 517.928.4, 628.4
ББК 78.34

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ, МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Кудрявцев В.А.¹

*(Кировский государственный медицинский
университет, Киров)*

Рычков С.Л.², Шатров В.В.³

(Вятский государственный университет, Киров)

Актуальность исследуемой проблемы обусловлена необходимостью оперативного управления процессом биологической очистки сточных вод. Процесс биологической очистки контролируется с помощью химического анализа практически вручную. При этом время проведения анализа соизмеримо с временем прохождения сточных вод в аэротенках. В данной работе предлагается математическая модель процесса биологической очистки, данные расчета которой используются для оперативного контроля с помощью аппаратно-программного комплекса (АПК) АКВА-ТЕСТ-АТ4М. АПК дает возможность обработки анализа качества воды в течение нескольких минут. При этом данные измерений дают возможность идентифицировать математическую модель биологической очистки. В работе приведены результаты экспериментов и математического моделирования работы очистных сооружений Кировских коммунальных систем (ОС ККС).

Ключевые слова: биологическая очистка сточных вод, измерение окисляемости воды, математическая модель очистки сточных вод.

¹ Владимир Алексеевич Кудрявцев, кандидат физико-математических наук, доцент (vak@kirovgma.ru).

² Сергей Леонидович Рычков, старший преподаватель (rychkov@list.ru).

³ Анатолий Викторович Шатров, доктор физико-математических наук, профессор (avshatrov1@yandex.ru).

1. Введение

Целью данного исследования является обоснование возможности оперативного контроля качества очистки сточных вод в аэротенках очистных сооружений. В настоящее время мы наблюдаем две взаимосвязанные, но противоположно направленные тенденции: с одной стороны – рост числа современных наукоёмких исследований, направленных на разработку различного рода способов очистки воды, и разговоров об этом, с другой – неуклонное снижение её качества. Обеспокоенность таким положением в системе снабжения населения водой была выражена и на проходившем в марте 2009 г. в Перми межрегиональном конгрессе «Чистая вода» [8, 9]. Отмечалось, что в перспективном плане наиболее значимыми для питьевого водоснабжения населённых мест России, помимо усиления охраны водоисточников от загрязнений, представляются три основные проблемы: модернизация технологий водообработки и водоразводящих сетей, ревизия научных основ концепции питьевого водоснабжения, совершенствование мониторинга качества питьевой воды и законодательной базы в водохозяйственной области.

Мониторинг состояния окружающей среды, и прежде всего водных ресурсов, в настоящее время осуществляется с использованием колориметрических, нефелометрических, титриметрических, хроматографических и других, в том числе и сложных методов исследования [4–5]. Некоторые из них обладают достаточно высокой информативностью, но они, как правило, дороги, трудоёмки, не поддаются автоматизации. Важным недостатком является и то, что эти методы требуют предварительной подготовки образца и использования высокотоксичных реактивов, поэтому работа проводится в основном в условиях лабораторий. Для повышения оперативности исследований разработаны экспрессные методы химического анализа – тест-системы, основанные на визуально-колориметрических и спектрофотометрических методах оценки. Эти методы обладают относительно низкой чувствительностью и также не могут быть использованы для жёсткого автоматического мониторинга окружающей сре-

ды. Многие из перечисленных способов исследования могут измерять один или ограниченный круг показателей состава воды, что для мониторинга в реальном масштабе времени в принципе недостаточно.

Целью данной работы является создание системы моделирования, мониторинга и управления процессом биологической очистки сточных вод на очистных сооружениях. Математическая модель позволяет сформировать функционал для идентификации модели и последующего управления процессом.

2. Методика экспериментальных исследований

2.1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Технические характеристики аппаратно-программного комплекса «АКВАТЕСТ-АТ4М» (базовая платформа – промышленный вариант) [6, 7]:

1. Измерение окисляемости воды – показатель химического поглощения кислорода (ХПК) в базовой комплектации (0,5–3000) мг О/дм³, погрешность измерения не превышает 3 %. Подача воды циклическая. Датчик – хемилюминесцентный. Использование специально разработанного реактора позволяет последовательно окислять сначала растворённые вещества, затем продукты их первичного окисления и т.д. В зависимости от «загрязнителей» и степени загрязнения цикл измерения длится от 0,5 до 10 минут.

2. Измерение электропроводности (5–3000), погрешность < 5 %. Применяется тетраэлектродный метод измерения.

3. Измерение температуры (4–60) °С, погрешность 5 %. Применяется выпускаемый промышленностью полупроводниковый датчик.

4. Измерение радиоактивности водного образца (β - и γ -излучения), погрешность 7 %. Датчик – счётчик Гейгера.

5. Масса 8 кг, габаритные размеры 150x400x540.

6. Время одного измерения в циклическом режиме (время цикла) от 0,5 до 30 минут (в зависимости от количества примесей в воде).

7. Имеется возможность измерения в потоке (отсутствие кривой окисления – на экране монитора отображается кривая изменения общей окисляемости воды – ХПК).

8. Возможность мобильного варианта – имеется (с энергообеспечением от автомобильного аккумулятора и др. источников).

9. Потребляемая мощность – не более 350 ватт.

10. Питание: от сети переменного тока 220 В или источника постоянного тока 12,6 В.

11. Вывод и хранение информации: компьютер.

12. Имеется возможность установить блок дистанционного управления и передачи информации по проводной линии или радиоканалу.

Для измерения качественного состава сточных вод в аэротенках ОС ККС использовался метод взятия проб по всей длине аэротенка, через равные промежутки. По всей длине аэротенка, разбитого на 8 симметричных участков, производится забор проб в равных количествах. Для взятия проб использовался заборник с 7 трубопроводами, пронумерованными соответственно местам взятия проб. Пробы взятой воды сливались в соответствующие номера ёмкости. Далее пробы после разведения дистиллятом до необходимой для точности измерения концентрации поступали на вход АПК АКВАТЕСТ-АТ4М для выполнения циклических окислительных реакций. На основании обсуждения имеющейся информации о работе ОС ККС, представленных данных о предыдущих исследованиях работы ОС основным объектом измерений были концентрации ЗВ азотной группы (аммоний – ион, нитриты – ион, нитраты – ион), а также показатель химического поглощения кислорода (ХПК).

Программное обеспечение комплекса выполнено в обычной конфигурации персонального компьютера и осуществляет как предобработку данных физико-химического анализа, так и преобразование, хранение, вывод и визуализацию цифровой информации в удобной и доступной форме, например в табличном редакторе MS Excell. На рис. 1–4 приведены примеры визуализации результатов измерения ХПК по длине аэротенка ОС ККС. Общая длина одного коридора аэротенка 216 метров. Пробы

взяты 06.02.2015 г. Приведенные графики характеризуют показатель ХПК как интегральную величину. АПК подсчитывает этот показатель как величину площади под кривой окисления, характеризующей интенсивность окислительных процессов в сточных водах.

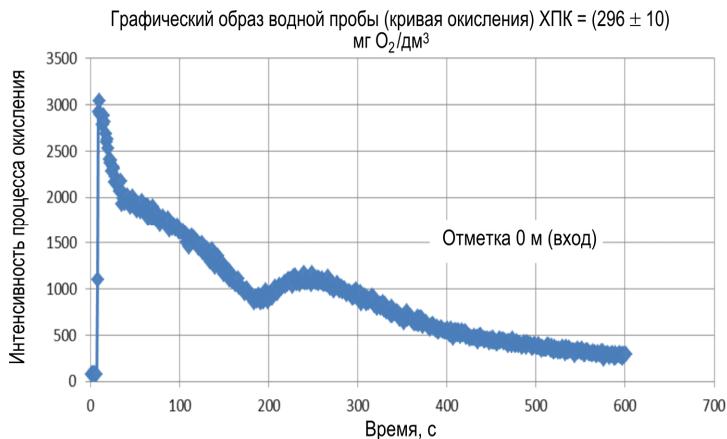


Рис. 1. Кривая окисления, отметка 0 м

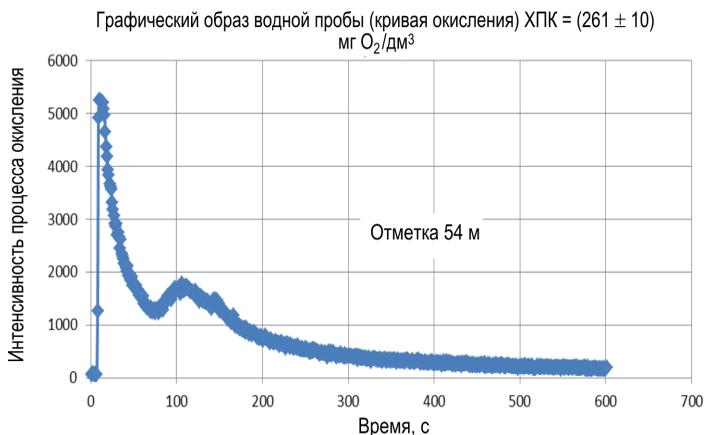


Рис. 2. Кривая окисления, отметка 54 м

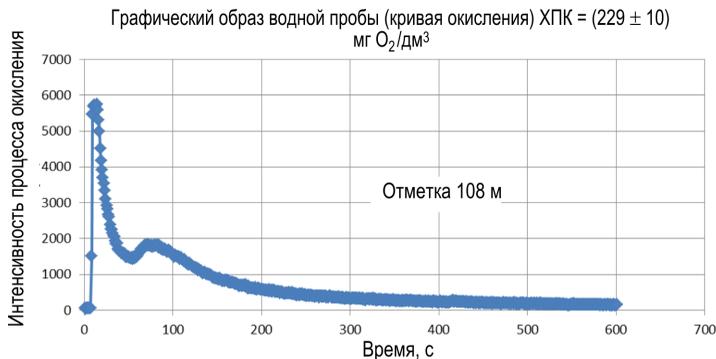


Рис. 3. Кривая окисления, отметка 108 м

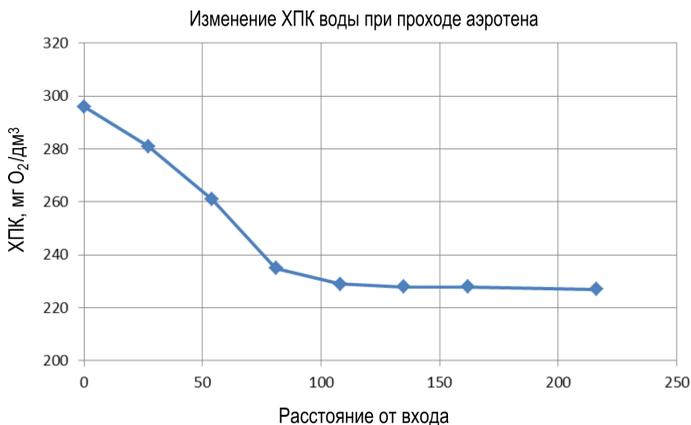
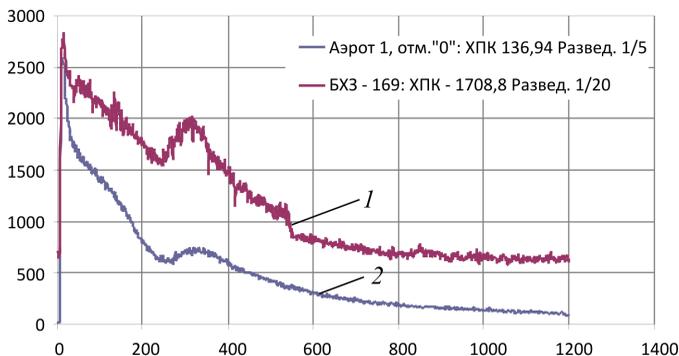


Рис. 4. Распределение показателя ХПК по длине 1-го коридора аэротенка

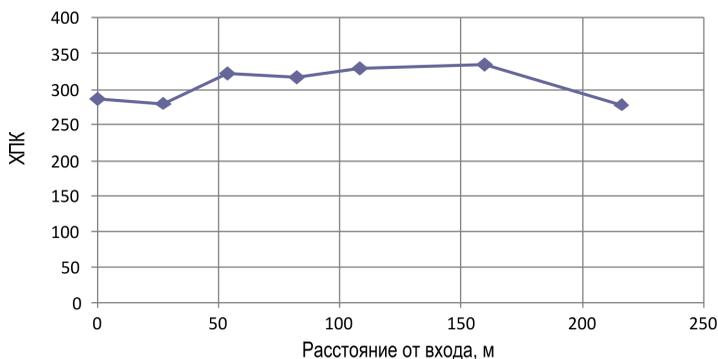
2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате экспериментов было обнаружено, что основные загрязнения в стоках от промышленных предприятий поступают в ОС ККС от сбросов ОАО «Кировский биохимический завод» (БХЗ). Следующая серия измерений, сделанная с 20.03.2015 по 26.03.2015, была выполнена в то время, когда в выпуске с ОС БХЗ поступали сильно загрязненные стоки. С учетом оценки влияния работы ОАО БХЗ 26.03.2015 были

взяты пробы одновременно на ОС ККС и ОС БХЗ. Для анализа взаимозависимости этих проб на рис. 5 производится их сопоставление. При этом распределение ХПК в 1-м коридоре аэротенка ККС имеет вид, приведенный на рис. 6.



*Рис. 5. Графики кривых окисления:
1 – БХЗ; 2 – ККС, пробы взяты на нулевой отметке*



*Рис. 6. Распределение показателя ХПК по длине
1-го коридора аэротенка ККС при сбросе ЗВ БХЗ*

В процессе экспериментов выяснилось, что важнейшим показателем загрязнений является наличие в стоках ЗВ азотной группы – аммоний-ион (NH_4^+), который в результате окислительных реакций переходит последовательно в нитрит-ион

(NO_2^-), нитрат-ион (NO_3^-). Взаимосвязь между показателем ХПК и концентрацией аммония в обычном режиме работы ОС ККС подтверждается графиками этих величин на рис. 7.

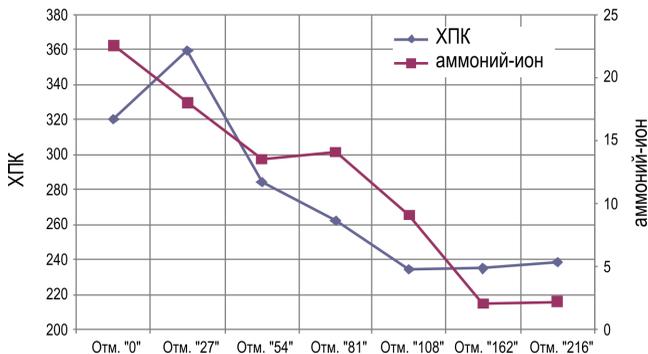
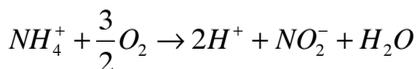


Рис. 7. Распределения ХПК и концентрации аммония по длине 1-го коридора аэротенка

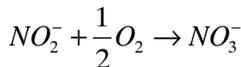
Измерения, проведенные по азотной группе, позволяют идентифицировать упрощенную математическую модель процесса биологической очистки.

3. Математической модели

Для описания процесса биоочистки сточных вод в аэротенках предложена математическая модель, учитывающая динамику концентрации субстрата азотного цикла и микроорганизмов двух видов. Удаление азота из сточных вод осуществляется путем нитрификации и следующей за ней денитрификации. Нитрификация – процесс окисления ионов аммония NH_4^+ до нитратов NO_3^- , который осуществляется в два этапа. На первом этапе бактерии вида *Nitrosomonas* окисляют аммоний до нитрита NO_2^- по схеме



На втором этапе бактерии *Nitrobacter* окисляют нитрит до нитрата по схеме



Денитрификация – процесс восстановления нитратов до молекулярного азота.

В работах [3, 11] рассмотрена модель нитрификации, в которой процессы, связанные с окислением азота, рассматриваются отдельно от остальных процессов биоочистки:

$$(1) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_1}{dt} = -\mu_1 \frac{N_1}{K_{N_1} + N_1} B_1, \\ \frac{dN_2}{dt} = \frac{\mu_1}{Y_1} \frac{N_1}{K_{N_1} + N_1} B_1 - \frac{\mu_2}{Y_2} \frac{N_2}{K_{N_2} + N_2}, \\ \frac{dN_3}{dt} = \frac{\mu_2}{Y_2} \frac{N_2}{K_{N_2} + N_2} B_2, \\ \frac{dB_1}{dt} = \mu_1 \frac{N_1}{K_{N_1} + N_1} - k_{d_1} B_1, \\ \frac{dB_2}{dt} = \mu_2 \frac{N_2}{K_{N_2} + N_2} - k_{d_2} B_2, \end{array} \right.$$

где N_1, N_2, N_3 – концентрации аммония, нитритов и нитратов соответственно; B_1, μ_1, k_{d_1} , и B_2, μ_2, k_{d_2} – концентрации, максимальные удельные скорости, константы отмирания микроорганизмов *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* соответственно; Y_1, Y_2 – экономические коэффициенты; K_{N_1}, K_{N_2} – константы полунасыщения. Начальные условия для системы (1) берутся по данным измерений в соответствующих начальных участках аэротенков, подбор параметров модели представляет собой отдельную задачу. Для решения системы (1) необходимо идентифицировать имитационную модель, используя данные измерения концентрации ХПК (химический показатель кислорода) и непосредственных измерений концентраций азотной группы на всем пути прохождения смеси сточных вод и активного ила

в аэротенке. Идентификация этой системы уравнений производилась на основе реальных измерений концентраций, представленных на рис. 1–7, выполненных прибором АкваТест 4М [6–8]. Необходимо идентифицировать имитационную модель (1) по следующим параметрам: μ_1 , k_{d_1} , и μ_2 , k_{d_2} – максимальные удельные скорости, константы отмирания микроорганизмов *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* соответственно; Y_1 , Y_2 – экономические коэффициенты; K_{N_1} , K_{N_2} – константы полунасыщения. Для подбора параметров модели используется квадратичный функционал отклонений расчетной концентрации ХПК и концентраций азотной группы от экспериментальных, минимизация которого дает возможность определения необходимых значений параметров.

Будем производить подбор параметров μ_1 , k_{d_1} , и μ_2 , k_{d_2} , Y_1 , Y_2 , K_{N_1} , K_{N_2} в следующем порядке: по данным измерения ХПК по всей длине аэротенка (см. рис. 4) идентифицируем параметры μ_1 , k_{d_1} и μ_2 , k_{d_2} . Параметры μ_1 , k_{d_1} , и μ_2 , k_{d_2} были неизменными для всех вариантов: $\mu_1 = 0,424$, $k_{d_1} = 0,01$, $\mu_2 = 0,173$, $k_{d_2} = 0,01$. По данным измерения азотной группы идентифицируем параметры K_{N_1} , K_{N_2} и Y_1 , Y_2 . Процедуру идентификации рассмотрим на примере азотной группы. По данным измерений (см. рис. 7, 8)

$$N_i^*(t_k); \quad t = 1, \dots, m; k = 1, \dots, p; t_k = \tau_k t_{\max};$$

$$(m = 3, p = 7, t_{\max} = 400 \text{ min});$$

$$\tau = \{0; 0,125; 0,25; 0,375; 0,5; 0,75; 1\}.$$

Так как $N_i(t)$ имеют разный порядок величин, введём весовые коэффициенты $W_i(t)$ так, чтобы средние значения $N_i(t)$ были одного порядка. Введём безразмерные величины

$$\xi_1 = \frac{K_{N_1}}{c_1}; \xi_2 = \frac{K_{N_2}}{c_2}; \xi_3 = \frac{Y_1}{c_3}; \xi_4 = \frac{Y_2}{c_4};$$

$$c_1 = 100; c_2 = 5; c_3 = 1; c_4 = 1.$$

Построим целевую функцию относительно этих переменных в виде квадратичного функционала

$$(2) \quad F(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p \{W_i [N_i^*(t_k) - N_i(t_k)]\}^2 \rightarrow \min.$$

В качестве алгоритма минимизации функционала (2) использовалась процедура минимизации функций DUMINE из пакета IMSL [5] Результаты вычислительных экспериментов приведены на рис. 9.

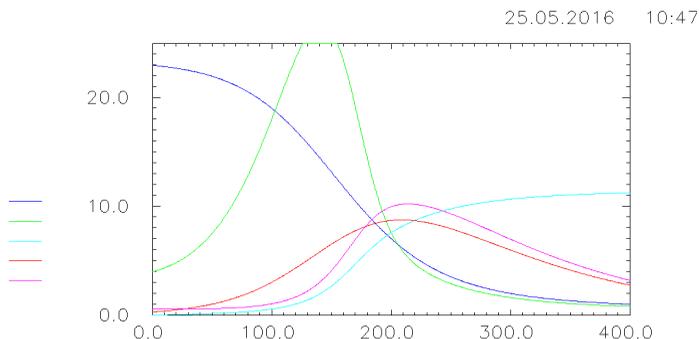


Рис. 9. Распределение концентраций аммония, нитритов, нитратов, бактерий Nitrosomonas и Nitrobacter (соответственно легенде по порядку)

4. Обсуждение и выводы

Следует отметить, что в тот период, когда брались пробы, результаты которых приведены на рис. 1–4, сбросы с ОС промышленных предприятий г. Кирова были относительно мало загрязнены. В этом режиме работы ОС ККС «справляются» с очисткой стоков достаточно эффективно и быстро: уже после прохода сточных вод половины длины коридора ХПК не меняется. В этих условиях технологию работы ОС можно изменить: сократить количество активного ила, уменьшить нагрузку на силовые установки, обеспечивающие перемешивание стоков в коридорах аэротенков. Данные меры приведут к существенной эко-

номии активного ила и электроэнергии. Приведенные результаты измерений с помощью АПК АКВАТЕСТ-АТ4М предоставляют возможность не только идентифицировать и произвести настройку математической модели процессов биологической очистки, но и, что более важно, осуществлять полноценный мониторинг очистки сточных вод предприятий. Идентифицированная математическая модель позволяет рассчитывать сценарные варианты влияния солей металлов на жизнеспособность бактерий в процессе биологической очистки.

Как указывается в исследованиях [2, 3, 10], в процессах биологической очистки непосредственно удаление группы металлов не происходит. Для этой цели используется доочистка с применением дорогостоящих реагентов или изменение принципа работы ОС состоящее в замене технологии вытеснения на технологию карусельного типа с дробным внесением реагентов. Влияние металлов на жизнеспособность бактерий в предлагаемой модели оценивается через сценарное изменение коэффициентов смертности бактерий. Рассмотрено 4 сценария и показано, что изменение этих коэффициентов существенным образом влияет на всю работы ОС: увеличение коэффициентов смертности на 30 % существенно подавляет эффективность работы активного ила, а рост их на 100 % и более фактически подавляет всю работу ОС в части биологической очистки (рис. 10–13).

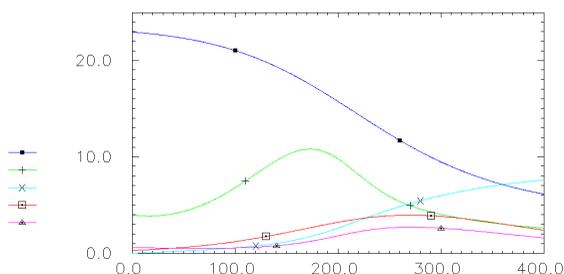


Рис. 10. Распределение концентраций аммония, нитритов, нитратов, бактерий *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* (соответственно легенде по порядку) при базовом варианте

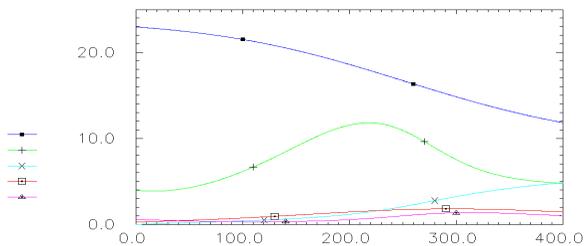


Рис. 11. Распределение концентраций аммония, нитритов, нитратов, бактерий *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* при коэффициентах смертности бактерий, увеличенных на 30 %

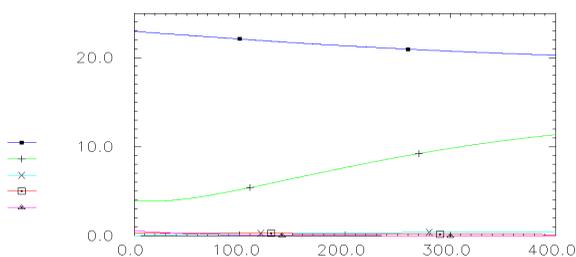


Рис. 12. Распределение концентраций аммония, нитритов, нитратов, бактерий *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* при коэффициентах смертности бактерий, увеличенных на 100 %

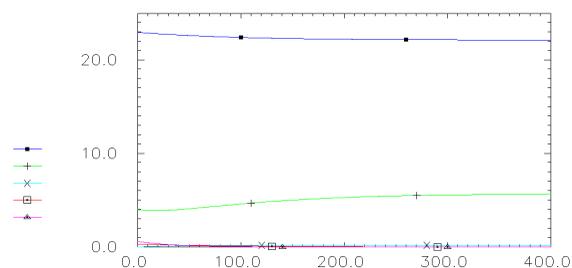


Рис. 13. Распределение концентраций аммония, нитритов, нитратов, бактерий *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* при коэффициентах смертности бактерий, увеличенных на 150 %

Возможности идентификации загрязнителей по уникальным маркерам, определяющих принадлежность сброса конкретному загрязнителю, могут быть реализованы, если процедура мониторинга будет осуществляться не только выборочно, но и систематически на выпусках из предприятий и на входе в ОС ККС. Настройка АПК на регистрацию других компонентов ЗВ возможна при использовании специальных датчиков, что повышает результаты мониторинга по всему спектру ЗВ.

Литература

1. БАРТЕНЬЕВ О.В. *Фортран для профессионалов. Математическая библиотека INSL. (Ч. 1, 2, 3).* – М.: Диалог-МИФИ, 2000. – 448 с.
2. ВАВИЛИН В.А., ВАСИЛЬЕВ В.Б. *Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом.* – М.: Наука, 1979. – 119 с.
3. КИРИЛЛОВ А.Н., СМИРНОВ Н.В. *Математическое моделирование процессов нитрификации и окисления органического вещества в системе биологической очистки // Вычислительные и информационные технологии для наук об окружающей среде: избр. тр. междунар. молодежной школы и конференции CITES-2013.* – М., 2013. – С. 132–135.
4. *Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера:* [ПНД Ф 14.1:2.1–95: утвержден Министерством охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации 20 мар. 1995 г.]. – М., 1995.
5. *Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации растворенного кислорода в пробах природных и очищенных сточных вод йодометрическим методом:* [ПНД Ф 14:1:2.101–97: утвержден Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды 21 мар. 1997 г.]. – М., 1997.
6. КУДРЯВЦЕВ В.А., ГАЛКИН А.А., ШЕШУНОВ И.В. *Способ исследования чистоты воды // Инновационные БИО-проекты.* Кировская область. Каталог. – Киров, 2008. – С. 88–89.

7. КУДРЯВЦЕВ В.А. *Современный аппаратный комплекс для получения информации о чистоте воды* // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: сб. тр. Десятой Междунар. науч.-практ. конф.; 09–11 декабря, Санкт-Петербург. – СПб., 2010. – С. 179–186.
8. *Модернизация станций подготовки воды муниципальных образований* / В.Н. АЛИКИН, И.Н. ШУБИН, М.С. ПЛЕХАНОВ, С.Н. ЮЖАКОВ // Чистая вода: сб. материалов межрегион. конгресса; г. Пермь, 11–12 марта 2009 г. – Пермь, 2009. – С. 23–24.
9. МОРИСАНОВА Е.И. *Портативные лаборатории для экспрессного контроля качества питьевых вод* // «Чистая вода»: сб. материалов межрегион. конгресса; г. Пермь, 11–12 марта 2009 г. – Пермь, 2009. – С. 28–30.
10. *Очистка сточных вод* / М. ХЕНЦЕ, П. АРМОЭС, Й. ЛЯ-КУР-ЯНСЕН, Э. АРВАН. – М.: Мир, 2004. – 480 с.
11. СМИРНОВ Н.В. *Математическое моделирование процесса биологической очистки сточных вод* // Ярославский педагогический вестник. Сер. Естественные науки. – 2012. – Т. 3, № 3. – С. 44–49.

SYSTEM OF MODELING, MONITORING AND CONTROL FOR THE PROCESS OF BIOLOGICAL SEWAGE TREATMENT

Vladimir Kudryavtsev, Kirov State Medical University, Kirov, Cand.Sc., assistant professor (vak@kirovgma.ru).

Sergey Rychkov, Vyatka State University, Kirov, senior teacher (rychkov@list.ru).

Anatoly Shatrov, Vyatka State University, Kirov, Doctor of Sc., professor (avshatrov1@yandex.ru).

Abstract: The actuality of present problem is caused by necessity of operative control of biological sewage treatment processes. A process of biological treatment is being checked by chemical analysis practically by hand. By the way duration of checking procedure is

commensurable with the time the sewage water is passing through an aeration tank. Thus any operative control of sewage treatment is practically impossible. In the present work to use for operative control the hardware-software complex (HSC) AQUATEST-AT4M. HSC is able to produce an analysis of water quality in some minutes. By the way the measurement data give the opportunity to identify a mathematical model of the biological sewage treatment. In this work there are presented the results of experiments and of mathematical modeling of work of the Kirov communal systems sewage treatment plants (KCS STP).

Keywords: biological sewage treatment, water oxidizability measurement, mathematical model of sewage treatment.

УДК 004.89 + 681.51
ББК 32.813

МОДЕРНИЗАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО НАСТРОЙЩИКА ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ БАЗЫ ПРАВИЛ ДЛЯ РЕЖИМА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Глущенко А.И.¹, Фомин А.В.²

*(Старооскольский технологический институт
им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ "МИСиС",
Старый Оскол)*

В статье приводится краткое описание нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора и предлагаемых новых условий для базы правил. Минимизирован один из существенных недостатков класса подобных систем настройки, представляющий собой ухудшение настраиваемого переходного процесса для улучшения качества следующего за ним. Проведено сравнительное моделирование с использованием старой и новой версии базы правил. Новая версия настройщика позволяет уменьшить время эксперимента на 28 % относительно ПИ-регулятора и на 14 % относительно старой версии настройщика. Она также снижает суммарное управляющее воздействие на 31 и 16,4 % соответственно.

Ключевые слова: нейросетевой настройщик, адаптивные системы, тепловые объекты управления, переходные процессы, нейронные сети, ПИ-регулятор.

1. Введение

На современном этапе развития автоматизированных систем управления и устройств их обеспечения имеет место активная модернизация технических средств автоматизации и

¹ Антон Игоревич Глущенко, кандидат технических наук, доцент (г. Старый Оскол, м-н Макаренко, д.42, (4725) 45-12-17, strondutt@mail.ru).

² Андрей Вячеславович Фомин, аспирант (г. Старый Оскол, м-н Макаренко, д. 42, (4725) 45-12-17, verner444@yandex.ru).

измерений. Активно развивается и микроконтроллерная техника, повышается её надёжность, увеличиваются вычислительные мощности. Однако данное развитие нивелируется использованием линейных алгоритмов управления – более 90 % промышленных ОУ функционируют под управлением классического ПИД-алгоритма [14, 17, 20]. Регулятор, реализующий данный алгоритм, является линейным, в то время как реальные объекты управления в большинстве случаев существенно нелинейны [18], что приводит к снижению качества регулирования, перерасходу энергоресурсов и браку продукции. Одним из способов решения данной проблемы является использование оптимальных [8–10] и адаптивных [7, 13] систем управления. Однако их применение сопряжено со следующими трудностями: для эффективного использования оптимальных систем необходимо наличие актуальной и точной математической модели объекта управления, что требует проведения процедуры идентификации [11], а это в реалиях производства является сложной задачей.

Другим вариантом решения данной проблемы является уход от жесткой привязки к модели объекта управления. Такими методами, например, являются адаптивные интеллектуальные методы управления, в частности экспертные системы [6], нейронные сети [15, 16, 19], нечеткая логика [5, 12] и системы, комбинирующие данные методы [1].

Системой на основе таких методов является нейросетевой настройщик параметров регуляторов [2–4], представляющий собой нейросетевую надстройку над классическим ПИ-регулятором. Используя базу правил, определяющую необходимость настройки регулятора и скорость обучения отдельных нейронов сети, система производит обучение такой сети, выходами которой являются новые параметры ПИ-регулятора. Высокая эффективность работы настройщика достигнута при использовании данной системы при работе с тепловыми объектами в технологических режимах, в которых преобладают частые смены уставок [4], также положительные результаты получены в режиме отработки возмущающих воздействий [3].

2. Описание нейросетевого настройщика

Проведем краткое описание нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора. Он представляет собой надстройку над классическим контуром управления. Использование данной схемы позволяет, не внося существенных изменений в систему управления, организовать адаптивное управление процессом.

Нейросетевой настройщик состоит из двух подсистем – нейронной сети и базы правил.

Задачей нейронной сети является численное изменение параметров регулятора. В нейронной сети реализовано три набора весовых коэффициентов (рис. 1), что позволяет иметь оптимальные коэффициенты для каждого из процессов: нагрева, остывания и компенсации возмущающих воздействий. Необходимость в трех наборах коэффициентов объясняется различным характером нелинейности объекта управления при нагреве и остывании [4, 18].

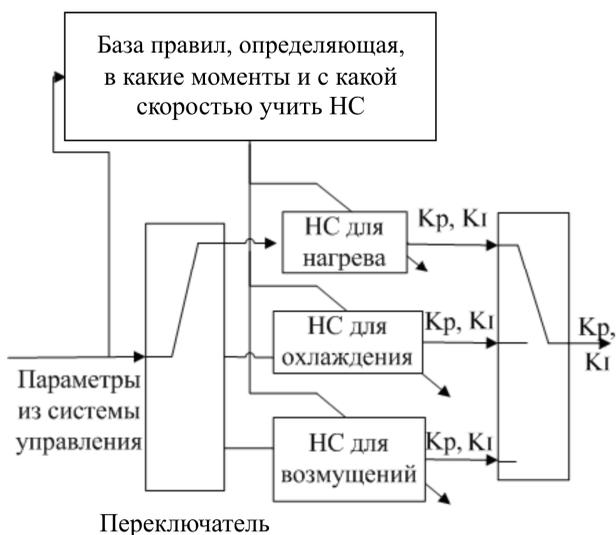


Рис. 1. Функциональная схема нейросетевого настройщика

Нейронная сеть, используемая в структуре нейросетевого настройщика, представляет собой трехслойную сеть прямого распространения сигнала, структура которой и её выбор подробно описан в [2]. Обучение сети ведется методом обратного распространения ошибки [19].

3. Описание проблемы

Адаптация, проводимая нейросетевым настройщиком, направлена на улучшение последующих переходных процессов относительно оцениваемого текущего процесса, качество которого не будет оптимальным. Более того, результатом работы части правил является ухудшение данного переходного процесса для улучшения последующих. Для примера, на рис. 2 приведена подобная ситуация: завышенный коэффициент K_P приводит к перерегулированию. Нейросетевой настройщик реагирует на данную ситуацию уменьшением K_P , что оптимизирует следующий переходный процесс, однако ухудшает текущий, так как уменьшение K_P увеличит время возврата на уставку. Подобные ситуации имеют место также при процессах нагрева.

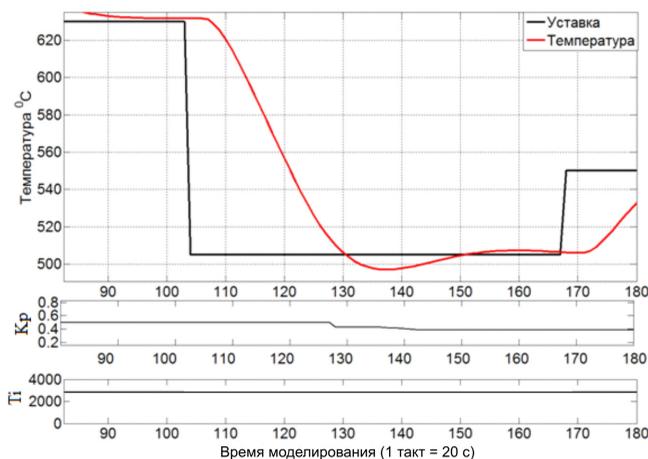


Рис. 2. Настройка регулятора на остывание, ухудшающая текущий переходный процесс ($T_i = 1/K_i$)

Для борьбы с данной ситуацией предлагается воспользоваться алгоритмом, реализованным для отработки возмущающих воздействий [3]. При идентификации системой действия возмущающего воздействия управление ведется нейронной сетью № 3.

Для того чтобы за минимальное время завершить настраиваемый переходный процесс, предлагается ввести следующие правила в базу правил:

1) Если ошибка больше 5 % разницы значений текущей и предыдущей уставок и скорость изменения температуры меньше уровня помех в установившемся режиме, и не срабатывают правила для переходных процессов, то произвести переключение управляющей нейронной сети на сеть № 3 и произвести настройку K_I с помощью выставления скорости обучения нейрона ответственного за K_I . Увеличение K_I позволит ускорить возврат системы в 5 % зону уставки.

2) Если произойдет срабатывание любого из правил для переходных процессов, управление переключится с сети № 3 на сеть № 1 или № 2 (в зависимости от текущего процесса: нагрев или остывание).

4. Экспериментальная проверка предложенной модификации настройщика

Для проверки эффективности данного обновления базы правил было проведено сравнительное моделирование.

Оно проводилось на модели лабораторной муфельной печи типа, полученной методом идентификации:

$$(1) \quad W_{ob}(S) = \frac{K}{T_1 S + 1} \cdot \frac{1}{T_2 S + 1} \cdot e^{-\tau s},$$

где $T_1 = 1636$ с, $T_2 = 69,4$ с, $K = 20,72$, $\tau = 64$ с.

Система управления выполняет следующий график уставок (каскад): 505–550–630 °С. Переходный процесс считался завершенным при нахождении ошибки по температуре в 5 % диапазоне разницы текущей и предыдущей уставок в течение 300 с. По завершении переходного процесса происходила смена уставки соответственно графику. Каскад уставок обрабатывался

3 раза, после чего менялись параметры модели объекта управления ($K = K - 10$, $T_1 = T_1 + 1000$ с), что моделирует загрузку стальной заготовки в печь. После четырехкратной отработки каскада уставок параметры модели возвращались к первоначальным, и график задания выполнялся еще 4 раза. В результате получены следующие графики, приведенные на рис. 3 и 4.

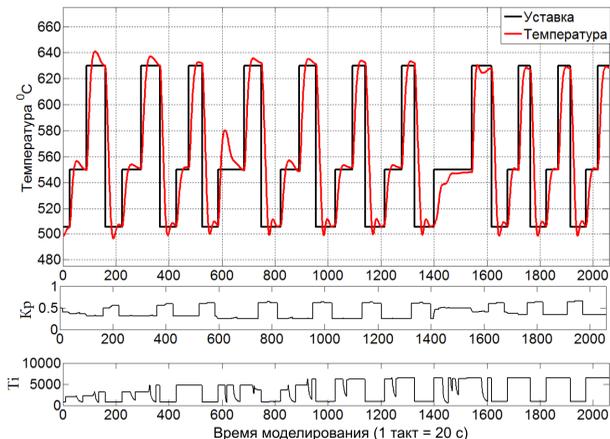


Рис. 3. Модернизированный нейросетевой настройщик

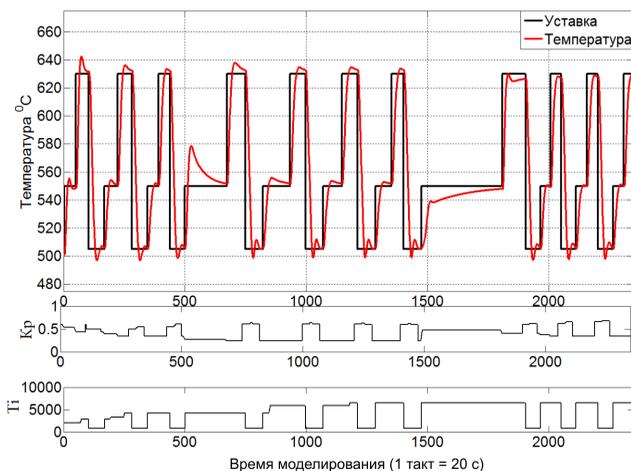


Рис. 4. Исходная версия нейросетевого настройщика

Требованиями к качеству переходного процесса выступают минимально возможное перерегулирование (в пределах 5 % от модуля разницы уставок) и минимально возможное время переходного процесса. С первого переходного процесса первого каскада каждую секунду интегрируется управляющее воздействие с регулятора. По завершении каскада уставок интегрирование прекращается.

Как видно из графиков, нейросетевой настройщик с обновлениями более эффективно обрабатывает каскад уставок, чем нейросетевой настройщик предыдущей версии. В таблице приведены сравнительные характеристики функционирования систем. Ввиду ограниченности объема статьи не приводятся графики аналогичного эксперимента, выполненного для ПИ-регулятора, но его результаты также внесены в таблицу.

Сравнительные характеристики работы двух версий настройщика

Фактор сравнения	ПИ	Нейросетевой настройщик	Модернизированный настройщик
Время эксперимента, час	14,83	12,77	10,67
Экономия времени, %	0	13,9	28,07
Суммарное управляющее воздействие, ед.	8297	6939	5723
Экономия по управляющему воздействию, %	0	16,37	31,02

5. Заключение

Результатом проведенного сравнительного моделирования является подтверждение эффективности новой версии нейросетевого настройщика. Удалось минимизировать один из недостатков подобных систем настройки, представляющий собой ухудшение настраиваемого переходного процесса для улучшения качества следующего за ним процесса. За счет использования новой версии настройщика удалось значительной сократить время эксперимента (на 28,07 % относительно ПИ-регулятора и на 13,9 % относительно старой версии настройщика)

и суммарное управляющее воздействие (на 31,02 и 16,37 % соответственно).

Литература

1. АНДРИЕВСКАЯ Н.В., РЕЗНИКОВ А.С., ЧЕРАНЕВ А.А. *Особенности применения нейронечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления* // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11–7. – С. 1445–1449.
2. ЕРЕМЕНКО Ю.И., ГЛУЩЕНКО А.И. *О разработке метода выбора структуры нейронной сети для решения задачи адаптации параметров линейных регуляторов* // *Управление большими системами: сб. тр.* – 2016. – Т. 62. – С. 75–123.
3. ЕРЕМЕНКО Ю.И., ГЛУЩЕНКО А.И., ФОМИН А.В. *Применение нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора нагревательной печи для отработки возмущающих воздействий различных типов* // *Системы управления и информационные технологии*. – 2016. – № 2(64). – С. 86–91.
4. ЕРЕМЕНКО Ю.И., ПОЛЕЩЕНКО Д.А., ГЛУЩЕНКО А.И. *О применении нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора для управления нагревательными печами в различных режимах работы* // *Управление большими системами*. – 2015. – Вып. 56. – С. 143–175 с.
5. КУДИНОВ Ю.И., КЕЛИНА А.Ю. *Упрощенный метод определения параметров нечетких ПИД-регуляторов* // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2013. – № 1. – С. 12–22.
6. МАЛЬЦЕВ С.А., ЛЕВАШКИН Д.Г. *Управление мехатронными системами на основе алгоритмов экспертных логических систем* // *Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. (Резниковские чтения) / Тольят. гос. ун-т. – Тольятти, 2015. – С. 334–337.*
7. НИКИФОРОВ В.О., ФРАДКОВ А.Л. *Схемы адаптивного управления с расширенной ошибкой. Обзор* // *Автоматика и телемеханика*. – 1994. – № 9. – С. 3–22.
8. ОМОРОВ Т.Т., ДЖОЛДОШЕВ Б. *О Краткий обзор методов анализа и синтеза нелинейных САУ* // *Изв. Кыргыз. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова*. – 2012. – № 26. – С. 172–183.

9. РОМАНОВА И.К. *Применение аналитических методов к исследованию парето-оптимальных систем управления* // Наука и образование. – 2014. – № 4. – С. 238–266.
10. САЛИХОВ З.Г., АРУНЯНЦ Г.Г., РУТКОВСКИЙ А.Л. *Системы оптимального управления сложными технологическими объектами.* – М.: Теплоэнергетик, 2004. – 496 с.
11. ШТЕЙНБЕРГ Ш.Е. *Идентификация в системах управления.* – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 80 с.
12. ШУЛАЕВА Е.А., ШУЛАЕВ Н.С. *Система управления температурными режимами электродинамического реактора* // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 11–4. – С. 133–136.
13. ALEXANDROV A.G., PALENOV M.V. *Self-tuning PID-I controller.* Proceedings of the 18th IFAC World Congress. – IFAC, Milano, Italy, 2011. – P. 3635–3640.
14. BEGUM K.G., RAO A.S., RADHAKRISHNAN T.K. *Maximum sensitivity based analytical tuning rules for PID controllers for unstable dead time processes* // Chemical Engineering Research and Design. – 2016. – Vol. 109. – P. 593–606.
15. CHEN J., HUANG T. *Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control* // J. of Process Control. – 2004. – No. 14. – P. 211–230.
16. EFFATI S., PAKDAMAN M. *Optimal control problem via neural networks* // Neural Computing and Applications. – 2013. – Vol. 23. – No. 7–8. – С. 2093–2100.
17. HÄGGLUND T., ÅSTRÖM K.J., *Supervision of adaptive control algorithms* // Automatica. 2000. – Vol. 36. – No. 8. – P. 1171–1180.
18. MIMURA K., SHIOTSUKI T. *Experimental study of PID auto-tuning for unsymmetrical processes* // Proceedings of ICCAS-SICE 2009. – IEEE, 2009. – P. 2967–2971.
19. OMATU S., KHALID M., YUSOF R. *Neuro-Control and its Applications.* – London: Springer, 1995. – 255 p.
20. VILANOVA R., VISIOLI A. *PID Control in the Third Millennium. Lessons Learned and New Approaches.* – London: Springer, 2012. – 595 p.

PI-CONTROLLER NEURAL TUNER PERFORMANCE IMPROVEMENT BY REFINEMENT OF ITS RULE BASE FOR TRANSIENTS

Anton Glushchenko, Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Stary Oskol, Cand.Sc ((4725)45-12-17, stromdutt@mail.ru).

Fomin Andrey, Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Stary Oskol, postgraduate (verner444@yandex.ru).

Abstract: A short description of a PI-controller neural tuner and new rules for its rule base are shown in this research. These new rules allow to overcome one of the main disadvantages of the adaptive control systems under consideration: a current transient quality deterioration in order to make better the following one. Comparative modelling experiments are made using the old and new versions of the tuner rule base. The new one allows to decrease the experiment time by 28 % and 14 % comparing to a conventional PI-controller and the tuner with the rule base of the old version respectively. The total control action signal is also decreased by 31 % and 16.4 % respectively.

Keywords: neural tuner, adaptive control, heating furnaces, transients, neural networks, PI-controller.

УДК 021.8 + 025.1
ББК 78.34

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ТЕОРИИ ГРУБЫХ МНОЖЕСТВ НА ИНТЕРВАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сыроквасов А.В.¹

*(Липецкий государственный технический
университет, Липецк)*

В данной статье рассматриваются основные проблемы программной реализации алгоритмов теории грубых множеств для решения задач классификации на интервальных данных.

Ключевые слова: грубые множества, интервальные значения, задачи классификации, объектно-ориентированное программирование.

При решении задач классификации, применяемых на практике, зачастую может потребоваться обработка больших объемов входных данных. Наборы исходных значений, которые необходимо классифицировать с заданной условием выборкой могут описывать реальные объекты или их свойства. Это повышает сложность математических моделей представления и требует дополнительных временных и вычислительных ресурсов.

Ускорить процесс обработки позволяют алгоритмы теории грубых множеств. Данный математический подход был разработан в 1982 г. польским ученым Zdzislaw Pawlak. Особенностью данного метода является описание неразличимости объектов, характеризующихся с точки зрения сходной информации, имеющейся для их описания [4]. Однако, в свою очередь, автоматизация алгоритмов теории грубых множеств требует построения организо-

¹ Александр Владимирович Сыроквасов, студент (alex.sirokvasoff2011@yandex.ru).

ванного вычислительного комплекса, так как расчеты производятся путем последовательного решения нескольких задач.

С точки зрения программной реализации рациональным решением является логическое разделение кода на отдельные модули, что значительно упростит задачу локализации расчетов, а также снизит объем написания текста программы. Удобным решением является проектирование с объектно-ориентированным подходом.

В ходе решения задачи будет получен определенный набор матриц. Он включает в себя матрицу начальной выборки, α -матрицу, матрицу толерантности и матрицу различимости. Каждая строка матрицы выборки характеризует определенный класс, атрибуты которого заданы в виде интервальных значений [1–2]. Набор атрибутов отображается в столбцах. Формат матрицы представлен в табл. 1. Данный пример рассматривает задачу прогнозирования качества литых слябов. Основным критерий классификации данных – наличие дефекта горячего проката, а атрибутами служат параметры разливки стали.

Таблица 1. Статистика

Набор классов	Набор атрибутов		
	$[a_{1min}; a_{1max}]$	$[a_{.min}; a_{.max}]$	$[a_{nmin}; a_{nmax}]$
Класс u_1	[0;4,9]	[0;14,89]	[201,3;260,6]
Класс u_2	[0;4,8]	[0;1,49]	[201,6;258,7]
Класс u_3	[0;4,8]	[0;11,03]	[201,26;259,41]
Класс u_4	[0;4,21]	[0;5,27]	[201,6;258,821]

Основной проблемой определения классификации по входной выборке является пересечение значений интервалов, которые относятся к одному атрибуту, но разным классам. Для анализа такого рода неопределенностей вычисляется α -матрица, размер которой равен $n \times n$, где n – количество классов. Таким образом, элемент на пересечении столбца i и строки j покажет вероятность ошибки отнесения тестового элемента класса j к классу i . Точность вычислений задает указанный пользователем параметр α .

Рассматривая полученные α -матрицы для каждого атрибута, можно построить матрицу различимости, размером $n \times n$ и содержащую на пересечении столбца и строки набор атрибутов, по которым данные классы можно считать различимыми.

На этапе проектирования объектного представления было выделено несколько классов. Основными являются классы Table и DefTab. Table хранит исходную таблицу выборки в виде вектора объектов Element, а также содержит в себе промежуточные матрицы расчетов и оперирует основными вычислительными методами.

Класс TabDef описывает матрицу различимости в виде вектора элементов класса Defelem. Фактически его экземпляр будет представлять собой трехмерный массив, область определения для третьей координаты которого будет не фиксирована в целях экономии памяти. Это обеспечивается за счет использования структуры вектора в представлении элемента матрицы.

Остальные классы выполняют вспомогательные функции для быстрого и упрощенного обращения к различным атрибутам основных массивов. Такими являются классы Element и Defelem, описывающие элементы матриц выборки и различимости. Кроме того, был выделен общий класс двумерных массивов для построения промежуточных структур, которые описывают неточность отношений классификации и толерантность отношений [3, 5].

В ходе проектирования была построена схема, отражающая представление программы в виде логических блоков. Данный этап отображен на рисунке.

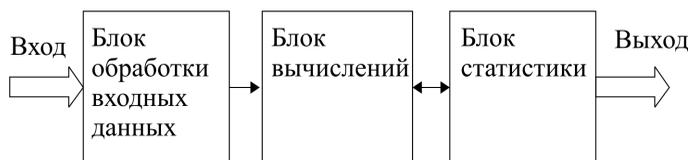


Рис. Схема представления программы в виде логических блоков

Входные данные представляют собой два файла расширения .csv. Выбор такого формата обусловлен простотой представления, что упрощает дальнейший парсинг и обработку. Первый из файлов содержит таблицу выборки объектов с заранее известной классификацией, второй – набор тестовых объектов, фактическая принадлежность к определенному классу которых не известна, но будет определена с заданной точностью в результате работы программных [4].

Блок обработки входных данных получает переданные на вход значения и переводит их в объектное представление, заполняя экземпляр класса Table. На этом этапе информация из файлов загружается в оперативную память для ускоренного доступа. В этом же блоке динамически определяются размеры массивов для хранения матриц толерантности и оценки неточности построения классификации.

Блок вычислений производит все необходимые для расчетов математические операции. Здесь определяются матрицы ошибок, неопределенности и толерантности, а также выводятся правила классификации.

Блок статистики циклически обращается к блоку вычислений для определения зависимости коэффициента оценки классификации от заданного параметра α . За один шаг цикла при вызове блока вычислений строится новая матрица неопределенности, по которой сразу вычисляются правила классификации. Далее для тестового множества выводится матрица оценки, на главной диагонали которой указано количество верно классифицированных элементов. По ней с использованием следующей формулы определяется итоговый коэффициент, который заносится в таблицу статистики:

$$(1) \quad k = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ii}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij}} .$$

После этого цикл повторяется для получения коэффициента при новом параметре α .

Итогом работы программы является набор статистических данных в формате табл. 2.

Таблица 2. Статистика

Параметр α	Коэффициент оценки классификации
0,1	0,374
0,2	0,374
0,3	0,374
0,4	0,374

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта 17-47-480305-р_а.

Литература

1. САРАЕВ П.В. *Интервализация в задачах классификации и анализе качества литых слябов* // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. – М., 2015. – С. 275.
2. САРАЕВ П.В., ПОЛОЗОВА Ю.Е. *Перспективы интервального нейросетевого моделирования и прогнозирования* // Вестник ЛГТУ. – 2016. – № 4 (27). – С. 6–13.
3. *A rough set approach for the discovery of classification rules in interval-valued information systems* / Y. LEUNG, M.M. FISCHER, W.-Z. WU, J.-S. MI // International Journal of Approximate Reasoning. – 2008. – Vol. 47. – Iss. 2. – P. 233–246.
4. PAWLAK Z. *Rough Sets* // International Journal of Parallel Programming, 1982. – № 11(5). – P. 341–356.
5. BELLO R., VERDEGAY J.L. *Rough sets in the Soft Computing environment* // Information Sciences. – 2012. – No. 212. – P. 1–14.

**ARTICLE TITLE, OBJECT ORIENTED APPROACH FOR
REALIZATION OF ALGORITHMS OF THE ROUGH SET
THEORY ON INTERVAL DATA**

Alexander Syrokovasov, Lipetsk State Technical University, Lipetsk,
student (alex.sirokvasoff2011@yandex.ru).

Abstract: this article deals with main problems of program realization of algorithms of the rough set theory. The paper discusses ways of calculation acceleration and using object oriented approach. Also here are modeling of logic blocks and parts of computing complex for determination experimental values of classes for input data. Here is the description of the representation of the main data structures and the statistics table.

Keywords: rough sets, interval values, classification problems, object-oriented programming

УДК 021.8 + 025.1
ББК 78.34

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Тюрин А.С.¹

(Липецкий государственный технический университет, Липецк)

В данной статье рассматриваются проектирование базы данных для организации стратегического управления процессами на металлургическом предприятии.

Ключевые слова: Oracle, Sybase PowerDesigner, концептуальная модель данных, ANSI/SPARC.

Современный подход к разработке баз данных предполагает использование архитектуры ANSI/SPARC. Архитектура систем базы данных ANSI/SPARC повсеместно распространена и имеет трехуровневую структуру. Она определяет три уровня абстракции, т.е. уровни описания данных: внешний, концептуальный и внутренний [6]. На концептуальном уровне обобщается совокупность всех требований к данным, полученных из пользовательских внешних представлений и формируется общее представление базы данных.

Цель работы – создать базу данных, которая позволит хранить в себе все необходимые данные для организации стратегического управления процессами, протекающими на металлургическом предприятии.

К основным фазам производства металла относят подготовку руды, восстановление и вторичную обработку. На всех трёх стадиях большую роль играет контроль за химическим составом

¹ *Алексей Сергеевич Тюрин, студент (leha2148@gmail.com).*

производимой продукции. Один из подходов к такому контролю – «поэлементное» управление процессами. Такое управление предполагает оперирование отдельными химическими элементами, что позволяет весьма точно контролировать состав металла и как следствие получать изделия требуемых характеристик. Поэлементное управление позволяет сократить выпуск несоответствующей продукции на каждом этапе производства, что даёт ощутимый экономический эффект.

Такое управление реализуется посредством составления математических моделей для установок на производстве. Эти модели позволяют выяснить, какими показателями будет обладать продукт на выходе при известных входных параметрах. Таким образом, передавая данные по цепочке от модели к модели, мы имеем полное представление о каждом этапе производства. Основным интерес при тестировании моделей представляет возможность отследить влияние на параметры выходного продукта оперирования отдельными химическими элементами. В соответствии с описанной областью применения и была разработана база данных.

Основная задача при разработке БД состоит в создании механизма хранения и отслеживания математических моделей, которые моделируют установку. Для работы модели необходим файл, в котором хранятся исходные данные. На выходе из модели также получается файл, но уже с выходными данными, которые впоследствии могут быть использованы как входные уже для модели другой установки. Также следует отметить, что в контексте данной задачи модель представляется в виде «чёрного ящика», а файлы входных и выходных данных, параметры установок и связей между ними рассматриваются более подробно. Данный этап проектирования принято называть системным анализом и словесным описанием информационных объектов предметной области. Именно от него зависят многие последующие решения о хранении в базе данных той или иной информации на этапе инфологического проектирования.

Инфологическое (концептуальное) проектирование предполагает создание информационной модели предметной области с ещё большим уровнем абстракции, которая не зависит от вы-

бранной СУБД. СУБД, впрочем, может быть выбрана гораздо позже. Концептуальное проектирование принято выполнять в ключе, в котором и заказчику информационной системы, и самому разработчику удобно общаться, не прибегая к узким и специфическим понятиям своей профессиональной деятельности. Именно концептуальный этап определяет, что будет храниться в создаваемой базе данных.

Модель «сущность-связь» (Entity-Relationship, ER-модель) является общепринятым средством проектирования и графического представления концептуальной модели данных [4].

Данный подход основывается на выделении в предметной области следующих объектов: сущность, атрибут сущности, ключевой атрибут, связь.

При анализе предметной области были выявлены следующие типы сущностей: агрегат, группа свойств, единица измерения, модель, путь, ресурс, ресурс агрегата, свойство, данные модели, данные. Следующий этап – наполнение сущностей атрибутами, характеризующими каждую из них. Зачастую встаёт проблема выбора – определить какое-то свойство реального физического объекта как сущность или атрибут. После определения основных сущностей следует установление связей между ними.

Сущность «агрегат» отражает в базе данных реальный объект – производственную установку. Это может быть станок или целое сооружение – доменная печь. Атрибуты агрегата: короткое имя агрегата, полное имя агрегата и id агрегата. Ключевой атрибут – id агрегата. Ключевой атрибут предназначен для однозначного идентифицирования экземпляра сущности в базе данных. В данном случае ключевой атрибут является искусственным.

Сущности «ресурс» и «ресурс агрегата» тесно связаны между собой. «Ресурс» отражает именно сам физический объект, материал для обработки на агрегате. Атрибуты – полное и короткие имена ресурса и его id. Однако ресурс может быть выходным продуктом по отношению к агрегату, поэтому была введена сущность «ресурс агрегата». Атрибуты «ресурса агрегата» – тип процесса и id типа ресурса. Тип процесса показывает, входом или выходом агрегата является ресурс. Таким об-

разом, «агрегат» имеет два типа «ресурса агрегата». В свою очередь, каждый ресурс связан с «ресурсом агрегата» и может одновременно являться входным и выходным по отношению к агрегату.

Для хранения свойств ресурса была введена сущность «свойство». Её атрибуты – короткое и полное названия, id свойства. Под свойством понимается какая-то характеристика ресурса. Так как таких характеристик может выделено очень много, для категорирования свойств введена сущность «группа свойств» (например, категория «химический состав»). Атрибут «группы свойств» – id группы свойств и название группы свойств. Для хранения единиц измерения свойства выделена сущность «единица измерения».

Модель обладает яркой выраженной зависимостью от агрегата, поэтому в концептуальной схеме данных она обозначена как слабая сущность. Сущность «модель» имеет довольно много атрибутов – разработчик, описание, дата, id модели, SHA-1 и сам бинарный файл.

Сущность «путь» отражает связь между двумя агрегатами. Атрибуты сущности – id старта и id конца, под которыми подразумевается какие-либо агрегаты.

Связи могут быть весьма разнообразными: один – к одному, один – ко многим, многие – ко многим. Кроме того, связь может соединять сущность саму с собой или между двумя типами сущностей может быть две различные связи. Однако в реальности между физическими объектами или явлениями существует огромное количество связей, и всё можно связать со всем. Главная задача проектировщика на данном этапе – выявить именно значимые связи, информацию о которых стоит хранить.

Так как схема маршрутов между агрегатами предприятия обширна и достаточно сложна, в схеме данных было предусмотрено отображение связей между сущностями «агрегат» и «путь» типами связей «старт» и «финиш», что позволяет представить направление движения ресурсов (вход или выход). Основываясь на полученных маршрутах, пользователь системы может отследить и последовательность моделей, которые он должен протестировать на своих данных, чтобы получить ин-

формацию о работе заданного участка производства. Однако модель агрегата – это слишком сложная структура. На практике же обычно составляют множество моделей, описывающих отдельные узлы или механизмы установки. Разрабатываемая система предполагает, что у одного агрегата может быть большое количество моделей, однако последовательность их работы всё же определяется непосредственно пользователем.

Отдельный интерес представляет описание в модели данных ресурсов агрегатов. В данной работе ресурс агрегата понимается в широком смысле – это может быть как химическое вещество, газ, сырьё в виде руды, так и изделия из металла (прокат, профиль и т.д.). При построении модели для установки программист может выяснить название ресурса и единицы измерения его свойств благодаря их отображению в базе данных. Для удобства отображения и систематизации свойств ресурса в концептуальную схему данных внесена сущность «группа свойств», которая объединяет характеристики в группы. К примеру, это могут быть группы «габариты» или «химический состав».

Для работы моделей, созданных программистами, необходимы файлы входных и выходных данных, которые также хранятся в базе данных. Для реализации хранения таких файлов были введены сущности «данные модели» и «данные». Файл данных представляет собой перечисление названий параметров установки и их численные значения. База данных позволяет узнать, какие выходные данные были получены на основе тех или иных входных файлов на конкретной модели.

Средства среды проектирования PowerDesigner позволяют быстро сгенерировать на основе созданной концептуальной модели логическую и физическую схему данных. Последняя генерируется под конкретную СУБД [1]. Следует также отметить возможность увидеть готовый SQL-скрипт для создания того или иного элемента базы данных ещё до генерации общего скрипта.

В ходе работы была выбрана СУБД Oracle, обладающая таким важным качеством, как неограниченный размер базы данных и лёгкость масштабирования. Естественно, разрабаты-

ваемая система продолжает совершенствоваться, усложняется схема данных. С ростом сложности схемы данных и объёмом хранимой информации зачастую возникает необходимость обновления аппаратных средств. Oracle же позволяет вводить в уже имеющийся кластер новое оборудование, сохраняя при этом в работе старое. Также Oracle предоставляет инструменты для имитирования реальной нагрузки на тестируемой системе, что позволяет выявить уязвимости ещё на стадии разработки. В Oracle Database поддерживаются различные типы индексов: B-tree cluster indexes, Hash cluster indexes, Reverse key indexes, Bitmap indexes, Bitmap join indexes. Каждый из типов индексов может обеспечить существенный прирост производительности в той или иной ситуации [5].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта 17-47-480305-р_а.

Литература

1. ИЛЮШЕЧКИН В. *Основы использования и проектирования баз данных*. – Litres, 2017. – 250 с.
2. ЛЬЮИС ДЖ. *Ядро Oracle. Внутреннее устройство для администраторов и разработчиков баз данных*. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 372 с.
3. ПОГОДАЕВ А.К., МУРАВЕЙКО А.Ю., ДЯТЧИНА Д.В. *Альтернативные соединения таблиц баз данных // Системы управления и информационных технологии*. – 2005. – № 5(22). – С. 99–102.
4. КАРПОВА И.П. *Базы данных: учеб. пособие*. – СПб.: Питер, 2013. – 240 с.
5. КАЙТ Т. *Oracle для профессионалов. Технологии и решения для достижения высокой производительности и эффективности*. – М.: Вильямс, 2016. – 960 с.
6. *Database System Concepts / Abraham Silberschatz, Henry F. Korth, S. Sudarshan*. – McGraw-Hill, 2011. – 1349 с.

THE DEVELOPMENT OF THE DATABASE FOR IMPLEMENTATION OF THE STRATEGIC MANAGEMENT PROCESSES CONCEPT FROM METALLURGICAL FACTURE

Alexei Tyurin, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, student
(leha2148@gmail.com).

Abstract: the article deals with the database development to describe main technological process in metallogical plant. The system being developed that for storing and using models describing installations is considered.

Keywords: Oracle, Sybase PowerDesigner, conceptual data model, ANSI/SPARC.

УДК 519.714.2
ББК 32.965.5

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

Гусев С.С.¹

*(Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

Информационные технологии в современном мире играют значительную, а может быть, главную роль в управлении сложными системами. Информационные технологии обеспечивают возможность активного участия человека в становлении важных физических процессов, явлений, событий, что позволяет их использовать в теории управления сложными системами, построении математических моделей, методов и алгоритмов идентификации сложных систем управления.

Ключевые слова: информационные технологии, математические модели и методы, алгоритмы идентификации, физические процессы, управление сложными системами, теория управления.

С начала 80-х гг. XX в. информационные технологии (ИТ) стремительно развиваются, и на сегодняшний день они заняли свою определенную нишу в [1] управлении сложными системами. Этот процесс развития ИТ стал необратимым и уже сейчас на их базе создаются автономные системы в управлении, которые позволяют самостоятельно обучаться и создавать математические модели и методы сложных систем в управлении. Роль ИТ такова, что управление сложными системами без их участия уже невозможно. Построение математических моделей и методов неразрывно связано с ключевой ролью участия ИТ. Информационные технологии совершенствуются как по своим пара-

¹ Сергей Сергеевич Гусев, соискатель (gs-serg@mail.ru).

метрам, так и по структуре. Статья посвящена роли ИТ в управлении сложными системами и построению математических моделей и методов на их основе.

Математические модели и методы в ИТ играют важную роль в управлении сложными процессами, явлениями, системами. С участием математических моделей и методов применительно к математическим моделям можно легко прогнозировать поведение сложных систем в управлении. Так, базируясь на математических методах, можно создавать математические модели сложных объектов в управлении и управлять ими. Однако роль ИТ в управлении неразрывно связана с участием человека в управлении сложными системами, несмотря на то, что многие физические процессы сложных объектов в управлении автоматизированы. Под автоматизированными системами управления понимаются [1] такие системы, которые способны к саморегулированию, самоуправлению сложными технологическими процессами. Однако право преемственности в управлении сложными системами остается за человеком, правда, не всегда. Дело в том, что человек не ко всем сложным системам управления имеет прямой открытый доступ. Прежде всего это касается таких объектов управления, как атомные электростанции (АЭС). Существуют, например, системы управления защитой на АЭС, которые предотвращают аварийные ситуации без участия человека. Конечно, в первую очередь в таких ситуациях ключевую роль играет автоматика – аварийная защита. Но современные АЭС снабжены информационной поддержкой оператора АЭС, и поэтому непосредственно ИТ в АЭС тоже присутствуют.

Роль ИТ в управлении сложными системами [1] не ограничивается только одним вышеприведенным примером сложных систем управления. Существует множество математических моделей сложных систем, в которых ИТ играют важную роль. Это может касаться пилотирования, аэродинамики, космоса, любого вида сложной техники и технологии, заводов, предприятий, промышленности и т.д. Ключевая роль ИТ в управлении заключается прежде всего в информатизации, в вычислительных процессах при управлении сложными объектами, системами управления, построения математических моделей и методов. Можно

сказать, что математические модели и методы сложных систем управления компьютеризированы. И ни одна сложная система управления с протекающим в ней физическим процессом не обходится без участия ИТ.

Одним из принципов функционирования сложных систем является потребность в связи и управлении. Кибернетика – универсальная наука об управлении и связи, для которой организационное управление – одно из многих приложений. Одна из тенденций в кибернетике состоит в переносе подходов и результатов из области управления техническими системами в практику организационного управления (например, решения задач оптимального управления на основе моделей динамики системы, задаваемой с помощью дифференциальных уравнений) [1].

Таким образом, кибернетика также ставит и решает задачи формирования рекомендаций. Однако она занимается и поиском общих законов управления, а значит, пусть и в меньшей степени, задачами прогноза, объяснения и даже описания [1].

Потребность во внедрении рекомендаций нормативных теорий в практику менеджмента посредством автоматизации соответствующих управленческих процессов заставляет вплотную заняться проблемами компьютерной реализации, в том числе численных алгоритмов и их сложности. Соответственно, прилагательное «вычислительный» (computational) или «алгоритмический» (algorithmic) переводит любое из перечисленных выше научных направлений в область вычислительной математики и информатики в аспекте применяемых методов [1].

Алгоритмизация и оптимизация технических и технологических процессов связана с информационными технологиями посредством вычислительной математики, построением математических моделей и методов. ИТ отведена первостепенная роль в управлении. Сложность технических, технологических процессов предопределяет роль ИТ в управлении сложными системами, процессами, явлениями. Математические модели и методы играют первостепенную роль в становлении сложных систем в управлении. Базируясь на математических моделях сложных объектов, строится идентичная объекту управления система – математическая модель, и по ней вычисляется комплекс параметров в управ-

лении для предсказания поведения системы объекта управления. Построение математической модели позволяет сделать ее простой для предсказания прогнозирующих параметров за счет математических методов, например алгоритмов идентификации. Алгоритмы идентификации также важны в теории управления, а следовательно, в управлении сложными объектами управления, базируясь на построении математических моделей и методов в ИТ. Как было сказано ранее, математические модели и методы компьютеризированы. Этот факт свидетельствует, насколько сильно современная наука привязана к ИТ. А это значит, что современные модели и методы используют «сильный» математический аппарат при построении математических моделей динамических объектов управления для вычисления параметров управления. Необходимость принятия решения при построении математического аппарата математических методов и моделей очевидна. Проблемы принятия решения – еще один краеугольный вопрос в управлении сложными объектами управления с использованием современных моделей и методов ИТ.

Развитие ИТ позволило сделать шаг вперед в управлении сложными системами. А именно: ИТ позволили прогнозировать сложные физические процессы, тем самым давая возможность управления математическими моделями сложных систем. Управление сложными системами предполагает управление сложным многосвязным объектом управления. Сам процесс управления подразумевает алгоритм действий на совершение некоего физического процесса в сложной системе управления и использования ИТ в качестве инструментария в управлении сложными системами. Математические методы и модели позволяют оптимизировать процесс управления, а следовательно, идентификации систем управления. Математические методы в ИТ важны, как никогда раньше. Современные ИТ близки к воплощению квантовых компьютеров, скорость вычисления которых на несколько порядков превосходит скорость вычисления самых современных суперкомпьютеров. Однако они находятся еще на стадии разработки и внедрения. Но в недалеком будущем стоит ожидать появления квантовых компьютеров.

Масштаб развития современных ИТ огромен. Современные ИТ сделали революционный шаг в своем развитии. И поэтому управление сложными системами управления для них не представляет особого труда. Но всегда существуют исключения. Несмотря на скорость вычисления (в серверных стойках суперкомпьютеров обычно измеряется десятками или даже сотнями терафлопов), такие ИТ могут затрачивать значительно больше времени на вычисление сложных физических процессов. Примером может служить наука о космосе или наука о ядерном энергетическом процессе, протекающем в активной зоне реакторной установки. Стоит отметить исключительность таких суперкомпьютеров, построенных на современной элементной базе ИТ.

Математические методы, которые применялись раньше уже не удовлетворяют требованиям современной науки. Уже применяются сложные модифицированные алгоритмы идентификации для построения сложных математических моделей все более сложных систем управления. Качество идентификации объекта управления в большой степени определяет и качество управления сложным объектом. Значительную роль при этом играет учет априорной информации о структуре и параметрах объекта. Параметры модели в процессе идентификации уточняются в соответствии с критерием максимальной близости (подобия) модели и объекта, что и определяет качество идентификации. Основная задача, возникающая при разработке алгоритма идентификации динамического объекта автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП), состоит в определении функциональной зависимости выходной переменной, которая представляет собой математическую модель объекта управления. Для построения функциональной зависимости выходной переменной АСУТП используется априорная информация об объекте управления.

Используя накопленный потенциал, нетрудно предположить, каким будет будущее информационных технологий. Уже сейчас внедряется искусственный интеллект в различные классы военных разработок, что говорит нам о перспективе дальнейшего их развития и [2] внедрения в гражданские нужды потребителей. Современные пилотируемые автомобили уже

вошли в обиход, смартфоны, профессиональные фотоаппараты, современные ИТ, снабженные саморегулированием и самонастраиванием. На предприятиях уже используются контроллеры, что позволяет автоматизировать конкретные узлы, линии, а человек лишь устраняет мелкие неполадки, когда на производственных конвейерах, линиях происходит внештатная ситуация. Задача ИТ в управлении не нова, еще в 60-х гг. XX в. зарождались новые идеи в управлении организационными процессами и производствами. А сами ИТ появились гораздо раньше. Поэтому теория управления активными системами занимает нишу в организационно-управленческой структуре управления.

В заключение стоит отметить, что в процессе функционирования любого реального объекта регистрируется большое количество данных, характеризующих динамику его работы в режиме нормальной эксплуатации или специально поставленных экспериментов. Реализации данных обладают большим динамическим разнообразием с точки зрения их тенденций, локальных структурных особенностей [3]. Процесс обработки большого массива данных является важнейшим инструментом, с помощью которого можно получать результаты работы вычислительных систем. Таким образом, информационным технологиям отведена ключевая роль в управлении сложными системами, построении математических моделей и методов систем управления.

Литература

1. *Теория управления организационными системами и другие науки об управлении организациями* / В.Н. БУРКОВ, М.В. ГУБКО, Н.А. КОРГИН, Д.А. НОВИКОВ // Проблемы управления. – 2012. – № 4. – С. 2–10.
2. ГУСЕВ С.С. *Роль информационных технологий в управлении сложными системами* // Интерактивная наука. – 2016. – № 8. – С 59–61.
3. БУРКОВ В.Н., ЗИНЧЕНКО В.И., КИСЕЛЕВА Т.В. *Локальный структурный анализ реализаций данных* // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 12. – С. 153–158.

INFORMATION TECHNOLOGY IN THE CONTROL OF COMPLEX SYSTEMS

Sergey Gusev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, per-graduated (gs-serg@mail.ru).

Abstract: Information technology in the modern world play a major and maybe a major role in the control of complex systems. Information technology provide an opportunity for active human participation in the development of important physical processes, phenomena, events, which allows their use in control theory of complex systems, constructing mathematical models, methods and algorithms for identification of complex control systems.

Keywords: information technology, mathematical models and methods, identification algorithms, physical processes, control of complex systems, control theory.

**КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ НА БАЗЕ
ЛУЧШИХ ПРАКТИК ОРГАНИЗАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВА**

А.В. Вожаков¹

(ОАО «Мотовилихинские заводы», Пермь)

М.Б. Гитман²

(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)

В.Ю. Столбов³

(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)

Рассматривается концепция создания автоматизированной интеллектуальной системы управления дискретным мелкосерийным производством, способной к самоконтролю и самоорганизации в условиях постоянно возникающих отклонений от изначального плана производства с использованием практик построения и оптимизации производственных процессов. Описаны характеристики уровней управления предприятия, произведена классификация задач управления по уровням управления.

Ключевые слова: производственная система, механизмы управления, производственное предприятие, уровни управления, математические модели, бережливое производство, теория ограничений, быстрореагирующее производство, практики управления, интеллектуальная система управления, автоматизи-

¹ Артем Викторович Вожаков, кандидат технических наук, (vozhakov@ya.ru).

² Михаил Борисович Гитман, доктор физико-математических наук, профессор (gmb@matmod.pstu.ac.ru).

³ Валерий Юрьевич Столбов, доктор технических наук (valeriy.stolbov@gmail.com).

рованные системы управления, информационная система, интеллектуальные элементы.

1. Введение

Управление производственными системами как частным случаем социально-технических систем [1] связано со значительными сложностями, вызванными неполнотой информации, конфликтами интересов и целей, быстрыми и многочисленными изменениями в окружающей среде промышленного предприятия. Кроме того, резко возрастают требования к гибкости производства и оперативности принятия управленческих решений, что, в свою очередь, обуславливает необходимость интеллектуализации и информатизации процессов управления и в конечном счете ведет к концепции построения интеллектуальной системы управления как основного механизма системы управления производственного предприятия.

2. Определение интеллектуальной системы управления производством

Рассмотрим основные определения, связанные с понятием *интеллектуальная система управления*. Ниже приведены определения понятий, наиболее подходящие в контексте рассматриваемой проблемы.

Система управления – систематизированный набор средств сбора сведений о подконтрольном объекте и средств воздействия на его поведение, предназначенный для достижения определённых целей. Объектом системы управления могут быть как технические объекты, так и люди [2]. В случае если в качестве объекта управления выступает производственное предприятие как организационная структура – будем говорить о системе управления производственным предприятием.

Автоматизированная система управления (АСУ) [automated, automatized control system (ACS), computerized control system, management information system (MIS)] – система управления, в которой применяются современные электронные средства обработки данных и экономико-математические методы для реше-

ния основных задач управления производственно-хозяйственной деятельностью. Это человеко-машинная система, в ней ряд операций и действий передается для исполнения машинам и другим устройствам (особенно это относится к так называемым рутинным, повторяющимся, стандартным операциям и расчетам), но главное решение всегда остается за человеком. Этим АСУ отличаются от автоматических систем, т.е. таких технических устройств, которые действуют самостоятельно по установленной для них программе, без вмешательства человека [3].

Система поддержки принятия решений (СППР) – соединение комплекса программных средств и аналитических моделей для решения широкого круга сложных задач в различных областях жизни, в том числе и в экономике – прежде всего в производстве. Это направление менеджмента использует достижения информационных систем и банков данных, операций, интерактивных режимов работы с ЭВМ. Мощное математическое обеспечение позволяет формулировать цели управления, корректировать их с учетом желаний и опыта менеджеров (этот опыт автоматически формализуется и фиксируется системой в процессе ее работы), находить и предлагать оптимальные средства и пути достижения целей. Существуют системы поддержки не только индивидуальных, но и коллективных решений. В последнем случае специальная программа ранжирует участников по степени их компетенции, учитывая это при согласовании мнений и выработке обобщенных рекомендаций. Многие СППР основаны на формализации функции полезности пользователя и выдаче альтернативы, максимизирующей эту функцию [3].

Интеллектуальная система (ИС) (англ. intelligent system) – это техническая или программная система, способная решать задачи, традиционно считающиеся творческими, принадлежащие конкретной предметной области, знания о которой хранятся в памяти такой системы [4]. В технологиях принятия решений интеллектуальная система – это информационно-вычислительная система с интеллектуальной поддержкой, решающая задачи без участия человека – лица, принимающего решение (ЛПР) [4]. Понятие интеллектуальной системы тесно связано с областью информатики, называемой искусственным интеллектом (ИИ). Существует много различных

определений ИИ. Ниже приведены некоторые из них: «[Автоматизация] видов деятельности, которые мы ассоциируем с человеческим мышлением (human thinking), таких как принятие решений, решение проблем, обучение ...» (Belman, 1978); «Изучение того, как заставить компьютеры делать вещи, которые в настоящее время лучше делают люди» (Rich, Knight, 1991) [4].

К одним из бурно развивающихся технологий ИИ относятся:

- 1) мягкие вычисления (нечеткие множества, нечеткая логика и т.п.);
- 2) интеллектуальные агенты и мультиагентные системы;
- 3) интеллектуальный анализ данных [4].

Рассмотренные определения будем называть интеллектуальной системой управления производственного предприятия – автоматизированной системой управления производством, удовлетворяющей следующим требованиям:

- 1) объектом управления является производство;
- 2) система является интеллектуальной системой с широким использованием технологий искусственного интеллекта;
- 3) содержит в себе систему поддержки принятия решений;
- 4) способна решать задачи управления в различных режимах:
 - в автоматическом режиме (без привлечения человека);
 - в автоматизированном режиме (с привлечением лиц, принимающих решения);
 - в режиме обучения и моделирования (для обучения персонала и моделирования деятельности).

3. Уровни управления

Процесс управления производственным предприятием может быть условно разбит на три уровня управления, характеризующихся собственным набором задач, различными периодами планирования и разным уровнем детализации (таблица).

Уровень стратегического управления. На стратегическом уровне происходит разработка и реализация действий, ведущих к долгосрочному превышению уровня результативности деятельности предприятия над уровнем конкурентов. На данном уровне решаются такие задачи, как анализ внешней среды и внутренней обстановки, выбор и разработка стратегии на уровне стратегиче-

Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами

ской зоны хозяйствования, проектирование организационной структуры, выбор степени интеграции и систем управления, определение нормативов поведения и политики в отдельных сферах ее деятельности, обеспечение обратной связи результатов и стратегии. Стратегическое управление обычно охватывает период времени 1–5 лет, минимальный шаг планирования 1 мес.

Предлагаемая классификация уровней управления

Свойства	Стратегический	Тактический	Оперативный
Уровень детализации	Виды продукции	Укрупненные объекты	Номенклатурная позиция
Горизонт	1–5 лет	1–6 месяцев	1–2 дня
Интервал	Месяц	День	Час
Оценка выполнения	Ежеквартально	Еженедельно	Ежедневно

Уровень тактического управления – осуществляется среднесрочное планирование хозяйственной деятельности предприятия, формируются портфели заказов на продукцию, разрабатываются планы закупок, планы продаж, планы производства и т.д. Горизонт планирования 1–6 мес. (в зависимости от длины производственного цикла предприятия). Детализация плана производится по дням.

Уровень оперативного управления – уровень выполнения конкретных действий и учета фактической деятельности на основе планов, полученных с более высоких уровней управления.

4. Декомпозиция системы управления на задачи управления

Одним из базовых подходов к описанию и формализации системы управления является декомпозиция системы управления по бизнес-процессам. Практически на каждом предприятии, схема бизнес-процессов будет отличаться, однако, несмотря на различия, системы бизнес-процессов будут подобны. Рассмотрим один из множества возможных способов декомпозиции системы управления производственного предприятия по бизнес-процессам (рис. 1).



Рис. 1. Система бизнес-процессов производственного предприятия

Особенность данной декомпозиции заключается в том, что процессы отнесены к одной из двух категорий: основная деятельность, обеспечение. Бизнес-процессы основной деятельности предприятия – это бизнес-процессы, создающие добавленную стоимость или же (экономика и финансы) являющиеся управляющими процессами, влияющими на деятельность предприятия в целом. Обеспечивающие бизнес-процессы не участвуют напрямую в процессе создания добавленной стоимости, однако от качества работы обеспечивающих бизнес-процессов будет зависеть способность предприятия осуществлять основную деятельность. При этом способ декомпозиции бизнес-процессов и разделение на категории являются условными и могут быть классифицированы в другом виде. Рассмотрим бизнес-процессы, отнесенные к основной деятельности предприятия.

Для каждого бизнес-процесса можно выделить ряд характерных задач управления, которые, в свою очередь, будут разделены по уровням управления и вместе с тем взаимосвязаны. Исходя из определения процесса управления будем рассматривать задачи управления как совокупность следующих задач: планирование, выполнение (учет), анализ, управляющее воздействие.

Для каждого типа задач управления необходимо сформулировать общую форму результата решения задачи:

1. Для задачи планирования результатом решения будет «план действий», рассчитанный с необходимой степенью детализации и удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к результатам планирования.

Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами

2. Для задачи учета выполнения плана результатом будет организованная система учета, информации о выполнении плана с необходимой степенью детализации, достоверности и оперативности формирования данных.

3. В результате анализа выявляются отклонения фактического состояния системы от планируемого, выявляются различные факторы возникновения ситуации, прогнозируются последующие состояния системы.

4. В результате управляющего воздействия должен быть сформулирован набор заданий с установленными сроками, ответственными (должностные лица или подразделения организационной структуры) и лимитами передаваемых полномочий для реализации управляющих воздействий.

Система управления предприятием						
		Обеспечение производства			Производство	
Стратегическое управление	Развитие и поддержка инфраструктуры	Развития персонала	Развитие взаимоотношений с поставщиками	Развитие производственной площадки	Формирование программы и целей в области качества	
	Управление парком оборудования: модернизация, инсталляция...	Управление персоналом: потребность, комплектация	Управление запасами: нормирование, места размещения	Управление портфелем заказов, договоры, сроки, график отгрузки	Формирование и реализация мероприятий по повышению качества	
Тактическое управление	Формирование графика плановых ремонтов оборудования	Формирование графика работы персонала	Планирование поставок материалов и комплектующих	Календарное планирование производства	Планирование целевых показателей качества	
	Оперативное управление оборудованием	Формирование сменно-суточных заданий	Оперативное планирование и контроль перемещений	Оперативное планирование и контроль производства	Контроль качества, анализ дефектов и причин возникновения	
Оперативное управление	Система мониторинга оборудования	Ввод данных о выполнении заданий	Ввод первичных документов: М-11, МХ-18	Ввод данных о факте выполнения плана производства	Ввод данных о результатах контроля качества	

Рис. 2. Задачи по уровням управления и бизнес-процессам

На рис. 2 представлены наиболее характерные на взгляд авторов задачи управления, непосредственно связанные с производством продукции.

5. Автоматизированные системы управления

С развитием компьютерной техники и увеличением сложности производственных процессов развитие получили автоматизированные системы управления, специализирующиеся на различных уровнях управления предприятия. Ниже приведены основные виды автоматизированных систем управления.

1. ERP-системы (англ. Enterprise Resource Planning – планирование ресурсов предприятия) – автоматизированные системы управления, реализующие процессы управления производством, трудовыми ресурсами, финансовым менеджментом и активами, ориентированные на непрерывную балансировку и оптимизацию ресурсов предприятия, обеспечивающие общую модель данных и процессов для всех сфер деятельности предприятия. Понятие ERP предложено в качестве развития стандарта MRP II. Системы данного класса охватывают стратегический и тактический уровни управления, объединяя все процессы предприятия в единую систему.

2. APS-системы (англ. Advanced Planning & Scheduling – усовершенствованное планирование) – программное обеспечение для производственного планирования, главной особенностью которого является возможность построения расписания работы оборудования в рамках всего предприятия. Полученные таким образом частные расписания производственных подразделений являются взаимосвязанными с точки зрения изделия и его операций (требование SCM – Supply Chain Management – управление цепочками поставок). Данный класс программного обеспечения находится на стыке ERP- и MES-систем, обладая признаками той и другой. Многие существующие ERP-системы имеют встроенные APS модули.

3. MES (англ. Manufacturing Execution System – система управления производственными процессами) – специализированное прикладное программное обеспечение, предназначенное для решения задач синхронизации, координации, анализа и оптимизации выпуска продукции в рамках какого-либо производства. MES-системы относятся к классу систем управления уровня цеха, но могут использоваться и для интегрированного

управления производством на предприятии в целом. Данный класс информационных систем работает от тактического уровня до оперативного уровня управления.

4. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных) – программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления. Данные системы относятся к оперативному уровню управления.

5. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) – группа решений технических и программных средств, предназначенных для автоматизации управления технологическим оборудованием на промышленных предприятиях.

6. Современные подходы к управлению производством

Параллельно с развитием автоматизированных систем управления развивались и подходы к организации и управлению производством. Следует выделить три наиболее проработанных подхода к организации и управлению производством.

1. Бережливое производство (lean production, lean manufacturing) – концепция управления производственным предприятием, основанная на постоянном стремлении к устранению всех видов потерь: перепроизводство, ожидание, ненужная транспортировка, лишние этапы обработки, лишние запасы, ненужные перемещения, выпуск дефектной продукции. Основными инструментами являются:

- поток единичных изделий;
- канбан – вытягивающая система;
- всеобщий уход за оборудованием (TPM);
- система 5S;
- быстрая переналадка (SMED);
- кайдзен;
- пока-ёкэ (защита от ошибок).

2. Теория ограничений (Theory of Constraints, TOC) – методология менеджмента, в основе которой лежит нахождение и управление ключевым ограничением системы, которое предо-

пределяет эффективность всей системы в целом. Основными инструментами являются:

- метод «буфер – барабан – веревка»;
- метод критической цепи.

3. Быстрореагирующее производство (Quick Response Manufacturing, QRM) – управленческая концепция, нацеленная на радикальное сокращение временных затрат на всех этапах производственного цикла и офисных операций. Основными инструментами являются:

- организация производственных ячеек;
- стратегия управления материально-техническими потребностями на уровне цеха POLCA.

На рис. 3 представлена сводная диаграмма распределения инструментов и автоматизированных систем управления по уровням управления предприятием. Следует сразу отметить, что предлагаемая классификация весьма условна и нужна в первую очередь для наглядного представления информации. В частности, многие могут не согласиться, что применение принципов бережливого производства возможно лишь на оперативном уровне.

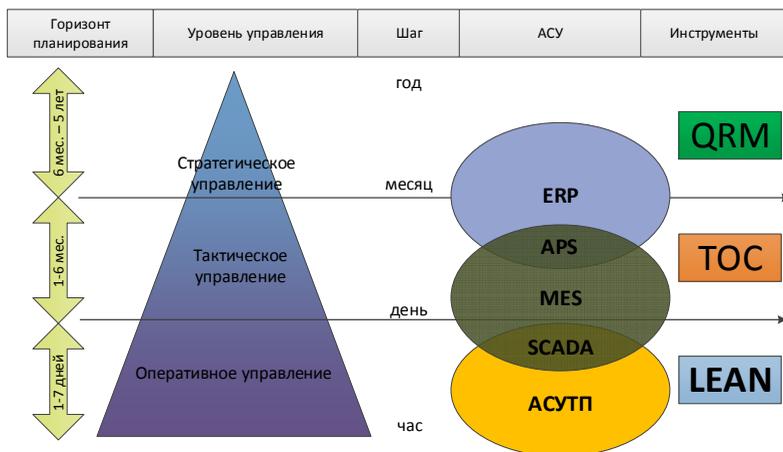


Рис. 3. Сводная диаграмма распределения инструментов и автоматизированных систем управления по уровням управления предприятием

7. Симбиоз автоматизации и рационализации производства

Развитие автоматизированных систем управления шло параллельно развитию подходов к организации и управлению производством. До сих пор ведутся споры относительно того, какой подход следует выбрать для оптимизации производственных процессов; различные подходы противопоставляются друг другу, приводятся аргументы о несостоятельности тех или иных подходов. Однако следует отметить, что все представленные системы управления и подходы имеют множество успешных внедрений по всему миру, что доказывает эффективность данных подходов по отдельности. На многих предприятиях параллельно внедряются как автоматизированные системы управления, так и принципы бережливого производства или теории ограничений, но ключевое слово здесь – параллельно, т.е. независимо друг от друга.

Между тем использование инструментов быстро реагирующего производства при планировании в ERP-системе могло бы привести к сокращению цикла производства продукции; анализ и выявление узких мест и создание буферных запасов деталей при планировании производства – могли бы увеличить пропускную способность производства; автоматизация механизмов потока единичных изделий и системы обратных связей (канбан) позволило бы существенно повысить устойчивость производства и снизить перепроизводство.

Таким образом, актуальной представляется задача применения инструментов оптимизации производства в автоматизированных системах управления производством. Данное направление на сегодняшний день малоизучено и недостаточно описано в российской и зарубежной литературе.

В рамках данной работы предлагается разработка математических моделей производственных процессов, опирающихся на информационные источники, генерируемые и хранимые в автоматизированной системе управления для решения прикладных задач управления производством с использованием лучших практик оптимизации производства.

Предполагается, что практическое внедрение лучших практик в механизмы работы автоматизированных систем управления позволит значительно повысить эффективность производства в целом.

8. Ситуационный центр промышленного предприятия

Качество принимаемых руководителями решений в значительной степени определяет эффективность функционирования любой организации, в том числе производственной системы. Повысить качество управленческих решений позволяет механизм коллективного принятия решений [3]. Реализация этого механизма требует разработки соответствующих инструментов, одним из которых может быть ситуационный центр промышленного предприятия (СЦПП).

СЦПП – человеко-машинная система, включающая помещение (зал, комната, кабинет), оснащённое средствами коммуникаций (видеоконференцсвязь, конференц-связь) для интерактивного представления информации, аудиовидеофиксации, предназначенная для оперативного принятия экспертами согласованных управленческих решений, контроля и мониторинга технологических и организационных процессов производства, а также анализа возможных ситуаций на основе интеллектуальных технологий поддержки принятия управленческих решений.

Ситуацией будем называть конкретное состояние исследуемой системы, которое возникло или может возникнуть в результате изменений как в самой системе, так и за счет внешних воздействий, требующее существенных изменений большого числа процессов, протекающих в системе. Например, ситуацией будет состояние производственной системы при поступлении крупного заказа (при высокой текущей загрузке мощностей) или резкого изменения конъюнктуры рынка. Тем или иным образом ситуация порождает одну или несколько проблем, которые, в свою очередь, требуют анализа, оценки, формирования модели решения, концепции для поиска решения и в конечном счете декомпозиции в ряд ситуационных задач, требующих системного решения. Например, ситуационной задачей является оценка

возможности выполнения срочного крупного заказа в указанный срок, с учетом текущей загрузки производственных мощностей и фактическим наличием свободных остатков материалов. Отметим, что, как правило, ситуации характеризуются наличием неопределенности, обусловленной, с одной стороны, неполнотой информации об условиях протекания исследуемого процесса, с другой – неопределенностью параметров, характеризующих и описывающих этот процесс.

Таким образом, для решения проблем, возникших в определенной ситуации, необходимо по крайней мере:

- произвести анализ ситуации, отражающий происходящие в системе изменения;
- выработать последовательность действий (сценарий), направленную на разрешение возникшей проблемы;
- осуществить раскрытие имеющихся неопределенностей;
- выявить перечень ситуационных задач, требующих решения;
- решить ситуационные задачи;
- сформулировать и принять промежуточные решения по отдельным элементам системы;
- сформулировать и принять общее решение по возникшей ситуации.

Как правило, для принятия промежуточных решений по отдельным элементам системы, требуется привлечение широкого круга представителей предприятия (руководителей и специалистов). Кроме того, для решения ситуационных задач необходим набор моделей, характеризующих как сами процессы производственной системы, так и их взаимодействие. В случае если процесс принятия решения может быть затруднен ввиду сложности возникшей ситуации, необходима разработка алгоритма поддержки принятия управленческих решений, строящегося на механизме принятия коллективных решений, подразумевающим наличие иерархии принятия решений на разных уровнях управления. При этом промежуточные решения на каждом уровне должны базироваться на объективных данных, получаемых в оперативном режиме из информационной системы предприятия. По существу, речь идет о реализации механизмов информатизации и интеллектуализации управления, которые совмест-

но с механизмом принятия коллективных решений являются методологической основой создания СЦПП [4].

При исследовании производственной системы могут быть выявлены наиболее характерные и значимые виды ситуаций, возникающие с определенной регулярностью. Характерные ситуации могут быть описаны в виде характерных признаков, входных данных и условий возникновения ситуации, а также в виде общей структуры решения, которое необходимо принять для разрешения возникших в результате ситуации проблем. При этом возникает необходимость в разработке общих моделей (алгоритмов) формирования и принятия решений для достижения поставленных целей.

Целью создания СЦПП является повышение качества принятия управленческих решений и формирование управленческих компетенций у менеджмента предприятия в условиях быстро меняющейся конъюнктуры рынка и состояния производства.

Для достижения данной цели СЦПП должен решать следующие основные задачи:

- мониторинг состояния объекта управления с прогнозированием развития ситуации на основе анализа поступающей информации;
- поддержка принятия управленческих решений на базе математического моделирования и использования информационно-аналитических систем;
- экспертная оценка принимаемых решений и их оптимизация;
- управление в кризисной ситуации;
- формирование управленческих компетенций.

В рамках решения первой задачи предполагается сбор и анализ поступающей информации о всех технологических процессах производства, а также выявление «узких мест» производства и прогнозирование конъюнктуры рынка.

Вторая задача включает разработку необходимых моделей поддержки принятия управленческих решений на стратегическом и тактическом уровнях планирования.

Экспертная оценка принимаемых решений и их оптимизация проводится на основе разработанных моделей и интеллектуальных технологий и приводит к изменению главного календарного

плана производства (при необходимости производится оптимизация решения с учетом стратегических целей предприятия).

Управление в кризисной ситуации определяется регламентом промышленного предприятия.

СЦПП также может быть использован для формирования профессиональных управленческих компетенций при освоении образовательных программ ВПО и ДПО, в том числе:

– для поддержки ресурсами и средствами разнообразных активных форм проведения занятий со слушателями всех видов и форм обучения;

– для поддержки ресурсами и средствами научно-исследовательских и информационно-аналитических работ, проводимых со слушателями;

– для обучения персонала ситуационных центров пользованию современными информационными, аналитическими и технологическими средствами;

– для проведения деловых игр; стендовой отработки интеллектуальных информационных технологий при принятии управленческих решений.

9. Практическая реализация

На сегодняшний день рынок автоматизированных систем управления является высококонкурентным рынком, на котором представлены как международные корпорации (SAP, Microsoft, Oracle), так и российские компании 1С, «Галактика» и т.д. В разработку и внедрение существующих на рынке систем вложены колоссальные средства, ввиду чего задача разработки новой системы управления производством класса ERP/MES представляется нецелесообразной и нереализуемой.

Однако большинство существующих на рынке систем позволяют расширять свой функционал, используя открытые интерфейсы обмена данными, позволяя внедрять в себя дополнительные модули и т.д. Используя данные механизмы, можно изменить механизмы работы системы и расширить функционал системы с минимальными трудозатратами. Такой подход ограничен в степени влияния на работу системы. В частности, он не

может изменить существующую модель данных или вмешаться в работу основных алгоритмов системы, но подход тем не менее обладает серьезным потенциалом.

Также следует отметить, что большинство конкурирующих на рынке систем имеют сходную модель данных, соответствующую стандартам MRP II, MES и т.д. Таким образом, программная реализация математической модели может быть использована для расширения функционала различных систем путем дополнительной разработки модулей интеграции.

Таким образом разрабатываемые математические модели должны максимально соответствовать стандартам в части модели данных, особенно это касается входных данных для задач. Использование дополнительной информации, не предусмотренной в стандартах, возможно только при определении способа получения этой информации: автоматический сбор данных, ручной ввод и т.д.

10. Концепция интеллектуальной системы управления производством

Будем называть интеллектуальным элементом – механизм, позволяющий в определенных ситуациях частично или полностью заменить собой лицо, принимающее решение.

В рамках данной работы, описывается интеллектуальная система управления производством, построенная на базе взаимно-интегрированных стандартных автоматизированных систем управления, ситуационного центра предприятия, расширяя функционал таких систем *интеллектуальными элементами*, способными в автоматическом режиме решать задачи оптимального управления и влиять на работу производства путем передачи управляющих воздействий в систему управления.

На рис. 4 представлена структурная схема интеллектуальной системы управления производством, точнее одной из возможных реализаций данной концепции.

Для обеспечения работы интеллектуальной системы управления производством требуется разработка целого ряда адекватных математических моделей, достаточно полно отражаю-

Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами

щих природу объекта управления. В рамках практического построения интеллектуальной системы управления необходимо сформировать перечень используемых математических моделей и обеспечить взаимосвязку моделей между собой и автоматизированной системой управления предприятием, которая будет выступать источником исходных данных для модели и куда будут направляться результаты моделирования.

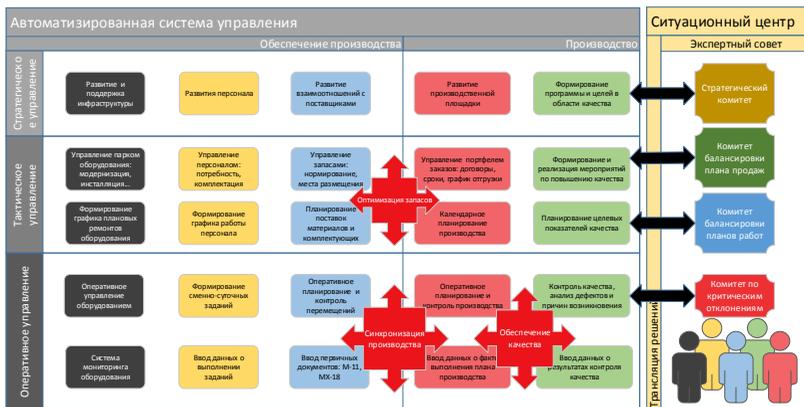


Рис. 4. Интеллектуальная система управления производством

Кроме того, следует отметить, что решением задачи управления может быть как единственное решение, так и Парето-множество допустимых решений. Как правило, выбор конкретного решения из множества решений задачи – это функция ситуационного центра предприятия, в рамках которого решаются задачи принятия коллективных решений на базе систем поддержки принятия решений.

В качестве интеллектуальных элементов на схеме выделены три основных элемента, работа которых основывается на принципах, заложенных в современные методики оптимизации производства:

1. Система синхронизации производства, позволяющая организовать вытягивающее производство в режиме реального времени отслеживая состояние производства в целом, выявляя отклонения и автоматически приостанавливая выпол-

нение не востребуемых работ и наоборот повышая приоритет работ, выполнение которых в данный момент наиболее актуально.

2. Система оптимизации запасов, позволяющая минимизировать затраты предприятия на закупку и хранение товароматериальных ценностей за счет анализа текущего состояния и прогнозирования будущего состояния производства и статистики закупок, внося корректирующие воздействия в нормативы закупок и хранения, а также приостанавливая поставки по проблемным заказам.

3. Система обеспечения качества, позволяющая минимизировать затраты, связанные с обеспечением необходимого уровня качества продукции, за счет анализа показателей качества, прогнозирования будущего состояния и анализа статистики дефектов, внося корректирующие воздействия в параметры работы сотрудников отдела технического контроля.

11. Заключение

На основании всего вышеперечисленного создание интеллектуальной системы управления производством может стать следующим этапом развития систем управления производством, а применение и объединение лучших практик и подходов к управлению производством создаст синергетический положительный эффект при практической реализации и внедрении системы. Результаты работы направлены в первую очередь на применение на мелкосерийных машиностроительных предприятиях, производящих сложную (состоящую из тысяч деталей) наукоемкую продукцию, с длительными цепочками технологических этапов и длительными циклами производства. Ожидается, что именно для таких предприятий эффект от внедрения будет максимальным. Однако предполагается, что использование системы на производствах другого типа также позволит повысить эффективность работы производства или по крайней мере снизить операционную нагрузку для поддержания системы управления.

Литература

1. ГИТМАН М.Б., СТОЛБОВ В.Ю., ГИЛЯЗОВ Р.Л. *Управление социально-техническими системами с учетом нечетких предпочтений*. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – 272 с.
2. ПЕРВОЗВАНСКИЙ А.А. *Курс теории автоматического управления*. – М.: Наука, 1986.
3. ЛОПАТНИКОВ Л.И. *Экономико-математический словарь: Словарь современной экономической науки*. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Дело, 2003. – 520 с.
4. ГАВРИЛОВ А.В. *Гибридные интеллектуальные системы*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 142 с.
5. ГОЛОКТЕЕВ К., МАТВЕЕВ И. *Управление производством: инструменты, которые работают*. – СПб.: Питер, 2008.
6. ЕВСТРАТОВ С.Н., ВОЖАКОВ А.В., СТОЛБОВ В.Ю. *Автоматизация планирования производства в рамках единой информационной системы многопрофильного предприятия // Автоматизация в промышленности*. – 2012. – № 1.
7. ЖИРНОВ В.И., СТОЛБОВ В.Ю. *Модель формирования оптимального плана производства как элемент системы поддержки принятия решений на стратегическом уровне управления предприятием // Теор. и прикл. аспекты информационных технологий: сб. науч. тр.; ГосНИИУМС*. – Пермь, 2007. – Вып. 56. – С. 87–96.
8. *Управление качеством продукции на современных промышленных предприятиях: моногр.* / С.А. ФЕДОСЕЕВ, М.Б. ГИТМАН, В.Ю. СТОЛБОВ, А.В. ВОЖАКОВ. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 229 с.
9. ФЕДОСЕЕВ С.А., ВОЖАКОВ А.В., ГИТМАН М.Б. *Управление производством на тактическом уровне планирования в условиях нечеткой исходной информации // Проблемы управления*. – 2009. – № 5. – С. 36–43.
10. ФЕДОСЕЕВ С.А., ВОЖАКОВ А.В., ГИТМАН М.Б. *Модель календарного планирования производства с нечеткими целями и ограничениями // Системы управления и информационные технологии*. – 2009. – № 3. – С. 21–24.

11. ГАВРИЛОВ Д.А. *Управление производством на базе стандарта MRP II*. – СПб.: Питер, 2002.
12. НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами*. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2012. – 604 с.
13. ВОЖАКОВ А.В., ГИТМАН М.Б., СТОЛБОВ В.Ю. *Ситуационный центр как инструмент интеллектуализации системы управления производством* // Интеллектуальные системы в производстве, 2013.
14. ФРОЛОВ Е.Б. *Производственная логистика, или что такое «вытягивающее» планирование?* // <http://www.i-mash.ru/economy/7691-vytalkivajushhaja-vytjagivajushhaja-sistemy.html>.

THE CONCEPT OF AN INTELLIGENT PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEM BASED ON THE BEST PRACTICES IN THE ORGANIZATION OF PRODUCTION

Artem Vozhakov, JSC Motovilikhinskiye Zavody, Cand.Sc. (vozhakov@ya.ru).

Mikhail Gitman, Perm National Research Polytechnic University, Doctor of Science (gmb@matmod.pstu.ac.ru).

Valerii Stolbov, Perm National Research Polytechnic University, Doctor of Science (valeriy.stolbov@gmail.com).

Abstract: The concept of creating an automated intellectual control system for discrete small-scale production, capable of self-control and self-organization under the conditions of constantly emerging deviations from an initial production plan using practices of constructing and optimizing production processes is considered. The characteristics of management levels of the enterprise are described, and the management tasks are classified according to management levels.

Keywords: production system, management mechanisms, production enterprise, management levels, mathematical models, lean manufacturing, constraint theory, prompt production, management practices, intelligent management system, automated management systems, information system, intellectual elements.

УДК 681.32
ББК 32.966

ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Васиньков В.А.¹, Прохоров А.С.², Тюрин С.Ф.³
*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

В статье анализируется состав систем управления авиадвигателя с точки зрения надёжности. Делается вывод о преобладании канального резервирования. Предлагается комбинированное резервирование на уровне элементов.

Ключевые слова: электронный регулятор авиадвигателя, надёжность, резервирование.

1. Введение

К современным летательным аппаратам предъявляются высокие требования в области стоимости эксплуатации, топливной эффективности и экологичности, поэтому построение новой энергетической системы, которая будет управлять всеми параметрами и агрегатами самолета, является важной задачей для производителей летательных аппаратов и систем для них [1–3].

В настоящее время для управления и регулирования работы газотурбинного двигателя используются системы трех видов: гидромеханическая, электронно-гидромеханическая, и электронно-цифровая система управления двигателем (ЭСУД) с полной ответственностью (или FADEC – Full Authority Digital Engine

¹ Валерий Анатольевич Васиньков, магистр (mr.valery4@yandex.ru).

² Андрей Сергеевич Прохоров, аспирант (proхор007@yandex.ru).

³ Сергей Феофанович Тюрин, доктор технических наук, профессор (tyurinsergfe0@yandex.ru).

Control system) [4–8]. Это предполагает также и обеспечение работоспособности в условиях ухудшения параметров самого двигателя, который может быть и один.

Большинство производителей ориентируются на переход к полностью электрической системе управления всеми органами летательного аппарата, в том числе и к электронной системе управления газотурбинным двигателем. На данный момент управление газотурбинным двигателем осуществляется с помощью двух систем: гидромеханической и электронной. Применение основной и дублирующей автоматики также не является оптимальным вариантом, так как ведет к дополнительным затратам при производстве, эксплуатации и обслуживании двигателя. Но для отказа от дублирующей автоматики необходимо, чтобы электронный контур управления двигателем был достаточно надежен [7, 8].

2. Аппаратный состав различных вариантов систем управления летательными аппаратами

Основой системы FADEC является электронный регулятор (РЭД) [7, 8]. На рис. 1 представлен состав такой системы.

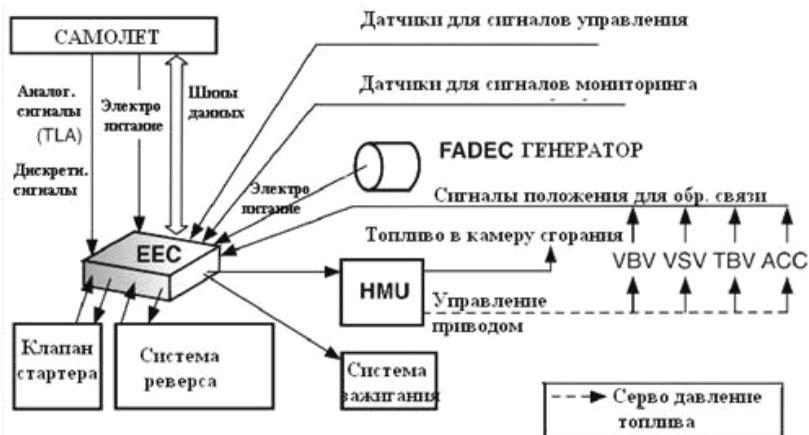


Рис. 1. Состав системы FADEC

Для обеспечения необходимых характеристик надежности РЭД двигателя CFM56-7B, устанавливаемого на самолеты Boeing 737, имеет два независимых компьютера, которые имеют названия «канал А» и «канал В». Система содержит большое количество датчиков, многие из них также дублируются в целях резервирования и повышения надежности. Некоторые датчики дублируются для каждого параметра и соединяются с блоком регулятора посредством отдельных коннекторов и разъемов. Общий принцип соединения датчиков с блоком регулятора показан на рис. 2.

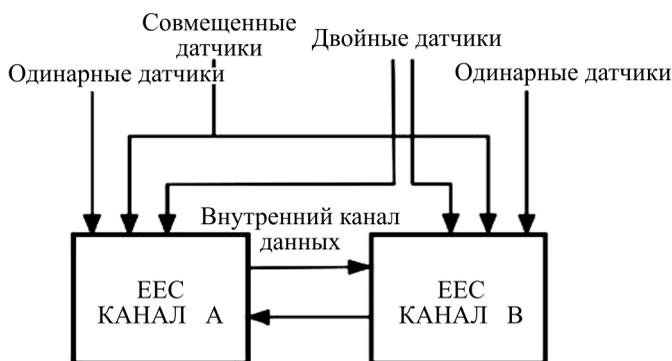


Рис. 2. Типы датчиков и их соединение с блоком регулятора

На блок регулятора приходят данные от самолетной системы, которые тоже приходят на оба канала регулятора (рис. 3).

Таким образом, все входные сигналы для блока РЭД являются двойными и обрабатываются одновременно двумя каналами, однако на выход поступают данные лишь с одного канала, который является командным. Канал, не вырабатывающий выходные воздействия, называется резервным. Он сможет стать командным при следующем запуске двигателя. РЭД может измерять частоты вращения вала, положения некоторых приводов и угол установки РУД. В большинстве случаев датчики двигателя имеют сдвоенную конструкцию. Если электрический датчик не является заменяемым при проведении технического об-

служивания, с основными датчиками установлены резервные (для каналов А и В соответственно).

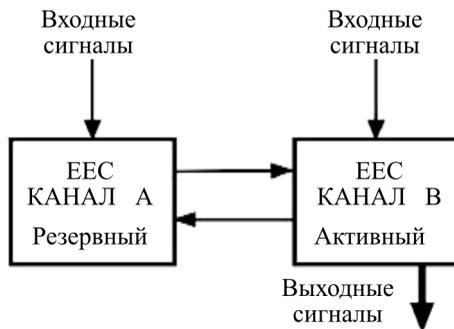


Рис. 3. Схема получения данных каналами РЭД

3. Комбинированное резервирование РЭД

Таким образом, надёжность РЭД обеспечивается резервированием управляющей аппаратуры, цепей датчиков и исполнительных органов на канальном уровне. С целью повышения надёжности электронных регуляторов авиадвигателей с FADEC предлагается комбинированное резервирование на уровне элементов, дополняющее имеющееся резервирование [5]. Рассмотрим предлагаемое резервирование на примере программируемой логики. Так, для программируемой логической матрицы (ПЛМ) [9] парирование r отказов по некоторой i -й переменной x (s -сигнал программирования или настройки) описывается выражением

$$(1) \quad f_j = \&\{[\bigvee_{\chi=1}^{r+1} (\& x_{i,\chi})] \vee [\bigvee_{\chi=1}^{r+1} (\& s_{i,\chi})]\} \{[\bigvee_{\chi=1}^{r+1} (\& x_{i,\chi})] \vee [\bigvee_{\chi=1}^{r+1} (\& s_{i,\chi})]\}; j=1, k.$$

Вероятность безотказной работы транзисторов по каждой переменной для экспоненциальной модели (модели Вейбулла) имеет вид

$$(2) \quad \sum_{i=0}^r C_{(r+1)^2}^i \left\{ e^{-[(r+1)^2-i] \cdot \lambda \cdot t^\alpha} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha})^i \right\},$$

где λ – интенсивность отказов одного канала; α – коэффициент распределения Вейбулла; $1 \leq \alpha \leq 2$, t – время работы; r – число парируемых отказов.

Парирование r отказов по некоторой i -й переменной в LUT (Look Up Table) ПЛИС FPGA [6] предполагает выражение

$$(3) \quad \bar{z}_{out.ft} = \bigvee_{i=1}^{2^n} \left(\big\&_{j=1}^n \left[\bigvee_{\chi=1}^{r+1} \left(\big\&_{\chi=1}^{r+1} x_{i,\chi} \right) \right]^{\sigma(i-1,j)} \cdot \bar{d}_i \right).$$

При этом затраты по каждой переменной в каждой ветви дерева возрастают с 1 до $(r+1)^2$. Так, в случае $r = 3$ парируется отказ любых 3 транзисторов по каждой переменной. Графики изменения вероятностей безотказной работы нерезервированного транзистора $P(t)$, схемы FCT, парирующей один отказ $P(t)_{fjm2}$, схемы FCT, парирующей два отказа $P(t)_{fjm3}$ и схемы FCT, парирующей три отказа $P(t)_{fjm4}$, изображены на рис. 4.

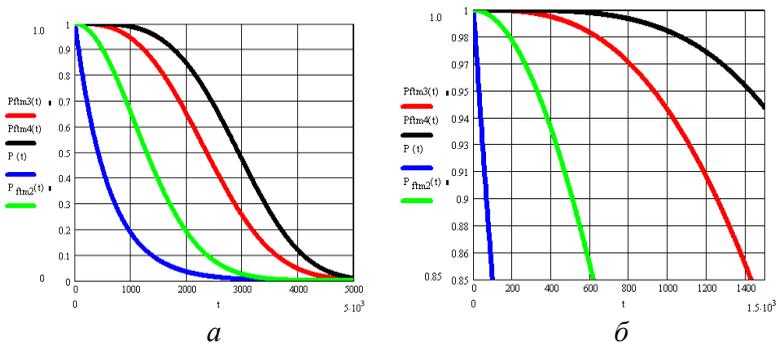


Рис. 4. Графики изменения вероятностей безотказной работы для нерезервированной переменной, для схемы FCT, парирующей один отказ $P(t)_{fjm2}$, для схемы FCT, парирующей два отказа $P(t)_{fjm3}$ и схемы FCT, парирующей три отказа $P(t)_{fjm4}$ при интенсивности отказов 10 в минус пятой степени 1/час: а – в диапазоне вероятности от 1 до 0; б – в диапазоне вероятности от 1 до 0,4

Литература

1. Система управления самолетом [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.studfiles.ru/preview/2021544/page:7/> (дата обращения: 18.06.2017).
2. ИНОЗЕМЦЕВ А.А. О программе создания авиационных газотурбинных двигателей пятого поколения для семейства самолётов МС-21 // Вестник Перм. науч. центра УрО РАН. – 2010. – № 4. – С. 28–46.
3. ИНОЗЕМЦЕВ А.А. История МиГ-31 продолжается [Электронный ресурс]. – URL: <http://vpk-news.ru/ARTICLES/15110> (дата обращения: 18.06.2017).
4. ОДК СТАР [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ao-star.ru/ru/search/node> (accessed at: 18 June 2017).
5. ТЮРИН С.Ф. Радиационно-устойчивая ячейка QSRAM // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 4 (12). – С. 14–30.
6. ТЮРИН С.Ф. Отказоустойчивый логический элемент LUT FPGA // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2014. – № 4 (27). – С. 97–103.
7. Fundamentals of Aircraft Turbine Engine Control. – URL: https://www.grc.nasa.gov/www/cdtb/aboutus/Fundamentals_of_Engine_Control.pdf (accessed at: 18 June 2017).
8. Propulsion Controls and Diagnostics Research at NASA Glenn. – URL: https://www.grc.nasa.gov/WWW/cdtb/aboutus/ric_overview_200707jpc.old.pdf (accessed at: 18 June 2017).
9. CPLD (Complex Programmable Logic Device). – URL: <http://www.myshared.ru/slide/981511/> (accessed at: 09 June 2017).

ELECTRONIC ENGINE CONTROL WITH COMBINED REDUNDANCY

Vasinkov Valeriy, Perm National Research Polytechnic University, Perm, student (mr.valery4@yandex.ru).

Prokhorov Andrey Sergeevich – JSC «ER-Telecom Holding», postgraduate student at the Department of Automation and Telemechanics, Electrical Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: npoxop007@yandex.ru

Tyurin Sergey Feofentovich Perm National Research Polytechnic University, Perm, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automation and Telemechanics (tyurinsergfeo@yandex.ru).

Abstract: The article analyzes the composition of aircraft engine control systems from the point of view of reliability. The conclusion is made about the predominance of channel redundancy. Combined element-level redundancy is offered.

Keywords: Electronic engine controller, reliability, redundancy.

УДК 004.93
ББК 32.813

КОМПЛЕКСНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ЗЁРЕННО-ФАЗОВОЙ СТРУКТУРЫ

Батин С. Е.¹, Гитман М. Б.²

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Рассматривается один из подходов к решению задачи дискриминантного анализа микроструктур функциональных материалов по комплексу физико-механических характеристик, основанный на теории нечетких множеств. Предлагаемый подход может быть использован в процессе выборочного контроля качества функциональных и конструкционных материалов. Предполагается, что исходные данные для задачи дискриминантного анализа могут быть получены на основе компьютерного распознавания образов при анализе микроструктуры исследуемого материала по цифровым фотографиям шлифов. Предлагается алгоритм решения задачи дискриминантного анализа зёренно-фазовых структур, позволяющий определять близость исследуемого материала к одному из классов на заданном множестве известных структур по комплексу физико-механических характеристик. Приводится демонстрационный пример применения разработанного алгоритма при анализе микроструктур по фотографиям микрошлифов закаленной стали с заданными прочностными свойствами.

Ключевые слова: функциональные материалы, фотографии микрошлифов, зёренно-фазовая структура, задача дискриминантного анализа, нечеткие множества

¹ Сергей Евгеньевич Батин, магистрант (sebatin@ya.ru).

² Михаил Борисович Гитман, доктор физико-математических наук, профессор (Пермь, ул. Анадемика Королева, д. 6, кв. 6, тел. (965) 554-19-47).

1. Введение

В последние годы в машиностроении резко возросла роль так называемых «функциональных» материалов (ФМ), которые обладают заранее заданным физико-механическими свойствами (электрическими, магнитными, прочностными и др.). Другими словами, ФМ должны обладать строго определенными и желательно настраиваемыми физико-механическими свойствами, дающими возможность реализовывать эксплуатационные характеристики конструкций и устройств, недостижимые при использовании других материалов. К таким материалам, в частности, могут быть отнесены различные металлические сплавы и композиты. Создание ФМ с оптимальными свойствами осуществляется путем усиления или подавления («тюнинга») каких-либо свойств уже имеющихся материалов и невозможно без привлечения современных экспериментальных и теоретических подходов. Ярким представителем функциональных материалов являются, например, металлические сплавы с мартенситными превращениями и эффектами памяти формы [5, 10].

Однако при этом возрастает необходимость разработки новых средств автоматизированного контроля качества подобных материалов для анализа сложных зёренных структур на мезо- или микромасштабных уровнях, отвечающих за формирование требуемого комплекса свойств на макроуровне.

Цель данной работы заключается в разработке подхода к решению задачи определения близости исследуемого материала к определенному классу, характеризующемуся заданным комплексом физико-механических характеристик, которые, в свою очередь, однозначно определяются параметрами его зёренно-фазовой структуры. При этом для исследуемого материала физико-механические характеристики считаются неизвестными, а задан набор параметров структурных характеристик. По сути, предлагаемая методика не предполагает задание конкретного вида аппроксимирующей функции и способа приближения к результату в виде, например, метода наименьших квадратов, а позволяет оценивать близость с помощью установления

отношений между параметрами зёрненно-фазовой структуры для заданных физико-механических характеристик материала.

Постановка задачи. Пусть задано набор образцов исследуемого функционального материала. Для каждого образца имеется цифровая фотография микрошлифа, анализируя которую с помощью компьютерного распознавания и сегментации образцов [9], можно определить основные параметры зёрненно-фазовой структуры. К таким параметрам можно отнести параметры фазового состояния, например объёмные доли фаз, а также параметры зёрненной структуры, например средний размер зерна, коэффициент вариации размера зерна, степень анизотропии зерен, объёмная доля зерен и т.п. Пусть количество выбранных параметров зёрненно-фазовой структуры равно некоторому числу k .

Требуется исходя из анализа параметров зёрненно-фазовой структуры исследуемого функционального материала оценить близость этого материала к определенному классу, характеризующемуся заданным комплексом физико-механических характеристик, в частности прочностных свойств. Считается, что каждый комплекс эксплуатационных характеристик однозначно определяется набором параметров зёрненно-фазовой структуры материала. Отметим, что классов материалов, определяемых комплексом физико-механических характеристик, может быть много. Однако с точки зрения разрабатываемого подхода достаточно рассмотреть разделение двух классов и без потери общности распространить полученный алгоритм на любое количество классов. Кроме того, при обосновании гарантированного качества исследуемого функционального материала достаточно рассмотреть два класса, один из которых включает материалы, удовлетворяющие заданным требованиям по физико-механическим характеристикам, а другой – материалы, у которых хотя бы одна характеристика выходит за допустимый диапазон значений.

Поставленная задача относится к задачам дискриминантного анализа, общую постановку которой можно найти, например, в работе [3]. В соответствии с ней необходимо найти такую решающую функцию $f: X \rightarrow R$, для которой выполняются следующие условия:

$$(1) \quad \begin{cases} f(x) > 0, & \text{для } \forall x \in a_1, \\ f(x) < 0, & \text{для } \forall x \in a_2, \end{cases}$$

где a_1, a_2 являются двумя заранее заданными классами. Как уже отмечалось, хотя постановка записана для случая с двумя классами, ее без потери общности можно распространить на любое количество классов.

Компоненты вектора x являются информативными признаками, а уравнение $f(x) = 0$ образует гиперповерхность, разделяющую объекты в пространстве их признаков.

Следует отметить, что сложность рассматриваемой в данном исследовании задачи связана еще и с тем, что объем исходной базы данных обычно невелик, а число классифицирующих признаков может быть значительным, причем часто они имеют нечеткую природу. Поэтому требуется разработка новых эффективных подходов к решению поставленной задачи, одним из которых может выступать подход, основанный на элементах теории нечетких множеств.

Подход к решению задачи дискриминантного анализа при нечетких исходных данных. Рассмотрим процесс получения функционального материала, в качестве которого выступает арматурная сталь с заданными прочностными свойствами, получаемыми путем специальной термообработки конструкционной стали марки 80P. Изменяя режимы обработки, можно формировать ту или иную зёрненно-фазовую структуру материала, которая, в свою очередь, определяет необходимый комплекс физико-механических характеристик. При этом анализ зёрненно-фазовой структуры материала осуществляется экспертным путем по набору фотографий микрошлифов. Например, на рисунке приведена фотография микрошлифа стали марки 80P, которая была подвержена термообработке по следующему режиму: нагрев до 930 °С, выдержка в течение 3 мин и охлаждение со скоростью 20 °С/с (исследования проведены в лаборатории металлографии НИИ наносталей при Магнитогорском государственном техническом университете). На этом рисунке представлен результат классификации шлифа экспертами из лаборатории металлографии.

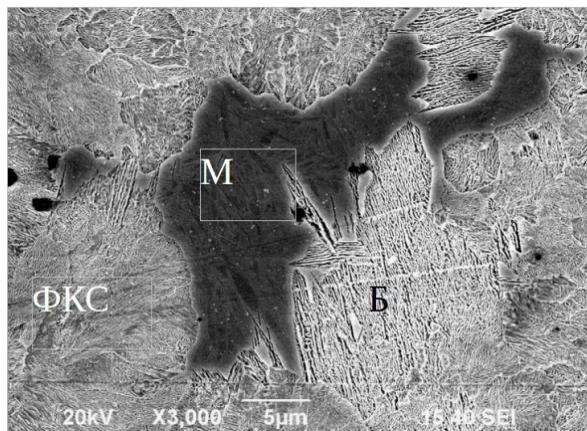


Рис. Результат анализа шлифа экспертами

На рисунке видно, что при термообработке кроме ферритно-карбитной смеси (ФКС) в материале возникают мартенситная (М) и бейнитная (Б) фазы, объемная доля которых существенно влияет на прочностные характеристики материала [4]. Кроме этого, существенное влияние на эксплуатационные свойства исследуемого материала оказывают параметры зёрненной структуры – средний размер зерна, коэффициент вариации размера зерна, степень анизотропии зерен и объемная доля зерен (ОДЗ), которые также существенно изменяются в процессе термообработки.

Будем считать, что количество имеющихся экспериментов (микрошлифов и соответствующих каждому из них замеров эксплуатационных характеристик исследуемого материала) равно l .

Введем *специальные* нечеткие множества для характеристик зёрненно-фазовой структуры и физико-механических характеристик материала (процедура определения *специального* нечеткого множества приведена в работе [2]).

Пусть A^i – *специальное* нечеткое множество, содержащее параметры зёрненно-фазовой структуры для i -го эксперимента, C^i – *специальное* нечеткое множество, содержащее эксплуатационные характеристики для i -го эксперимента.

В качестве основных параметров зёрненно-фазовой структуры исследуемого материала выбраны: объёмная доля фаз, соответственно ФКС, М и Б, а также параметры зёрненной структуры – средний размер зерна, коэффициент вариации размера зерна, степень анизотропии зерен и ОДЗ.

В качестве эксплуатационных характеристик исследуемого материала выбраны, например, такие прочностные характеристики, как твердость по Виккерсу (HV_{30}) и ударная вязкость (КС).

Отметим, что, как указано в работе [2], в отличие от *обычных* нечетких множеств, *специальные* нечеткие множества могут состоять из элементов различной физической природы с разными размерностями. При этом *важность* каждого i -го элемента *специального* нечеткого множества (в дальнейшем будем обозначать как μ_i для микросвойств и V_i – для макросвойств исследуемого материала) соответствует *функции принадлежности* элемента в обычном нечетком множестве.

Отметим, что общее количество пар элементов в нечетком множестве A^i равно значению d , а общее количество пар элементов в нечетком множестве B^i равно значению w , которые определяются следующим образом:

$$(2) \quad d = \sum_{i=1}^k p_i ; \quad w = \sum_{i=1}^r t_i .$$

Таким образом, для каждого i -го эксперимента ($i = 1, \dots, l$) общий вид специальных нечетких множеств A^i и B^i , которых можно представить следующим образом:

$$A^i = (\underset{p_1\text{-пар элементов}}{\text{ФКС}} , \underset{p_2\text{-пар элементов}}{\text{М}} , \dots , \underset{p_k\text{-пар элементов}}{\text{ОДЗ}}) ,$$

$$C^i = (\underset{t_1\text{-пар элементов}}{c_1} , \underset{t_2\text{-пар элементов}}{c_2} , \dots , \underset{t_r\text{-пар элементов}}{c_r}) .$$

Задача оценки близости исследуемого материала к определенному классу, характеризующемуся заданным комплексом физико-механических характеристик C^* , теперь определится *мерой близости* параметров зёрненно-фазовой структуры исследуемого материала к параметрам зёрненно-фазовой структуры

всех *тестовых* образцов (число которых равно l), для каждого из которых известно, принадлежит ли этот образец к классу с комплексом физико-механических характеристик C^* или нет.

Для определенности будем считать, что образцы с номерами от 1 до s , ($s \leq l$) принадлежат этому классу, а образцы с номерами от $s + 1$ до l – нет. Очевидно, что количество образцов, которые не принадлежат к классу с комплексом физико-механических характеристик C^* , равно m , где $m = l - s$. Отметим, что если *все* образцы принадлежат (или не принадлежат) классу с характеристиками C^* , то задача принадлежности исследуемого образца этому классу сразу решается однозначно.

Построим процедуру оценки близости исследуемого материала к классу с комплексом физико-механических характеристик C^* .

Обозначим (для упрощения записи) специальное нечеткое множество, содержащее параметры зёрненно-фазовой структуры для i -го эксперимента (A^i) через A , а соответствующее специальное нечеткое множество, характеризующее исследуемый материал, – B .

Теперь мера близости между специальными нечеткими множествами A и B (расстояние между этими множествами), которую обозначим ρ_i (так как A соответствует i -му эксперименту), может быть определена следующим образом:

$$(3) \quad \rho_i = \sum_{i=1}^d \mu_i \cdot \left| \frac{(a_i - b_i)}{\max(a_i, b_i)} \right|,$$

где d , как указано выше, определяется количеством пар элементов μ_i / a_i и μ_i / b_i в нечетких множествах A и B соответственно.

Пример. В качестве демонстрационного примера формирования функционального материала рассмотрим получение арматурной стали с заданными прочностными свойствами путем термообработки с различными скоростями охлаждения (исследования проведены в НИИ наносталей при Магнитогорском государственном техническом университете [3]). Для выявления качественных и количественных характеристик формирующейся структуры использовался исследовательский комплекс GLEEBLE

3500 с оптическим микроскопом Meiji Techno с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO, а также сканирующий электронный микроскоп JSM 6490 LV).

Результаты обработки экспериментальных данных анализа зёрно-фазовой структуры и эксплуатационных характеристик исследуемой стали, в том числе с использованием интеллектуальных технологий [7, 11], для 7 образцов, полученных при различных режимах обработки (скоростях охлаждения), приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты обработки данных анализа зёрно-фазовой структуры и эксплуатационных характеристик стали

№ п/п	Скорость охлаждения, °С/с	Параметры зёрно-фазовой структуры (размеры зерна в мкм)	Параметры фазового состава, %	Твердость материала HV ₃₀
1	10	Средний размер зерна: 0,10 Коэффициент вариации размера зерна: 0,11 Степень анизотропии: 0,98 Объемное содержание зерен: 0,87	ФКС: 100	400
2	20	Средний размер зерна: 0,10 Коэффициент вариации размера зерна: 0,07 Степень анизотропии: 1,14 Объемное содержание зерен: 0,26	ФКС: 60 Бейнит: 10 Мартенсит: 30	412
3	25	Средний размер зерна: 0,16 Коэффициент вариации размера зерна: 0,06 Степень анизотропии: 1,09 Объемное содержание зерен: 0,44	ФКС: 70 Бейнит: 20 Мартенсит: 10	436
4	30	Средний размер зерна: 0,26 Коэффициент вариации размера зерна: 0,17 Степень анизотропии: 1,18 Объемное содержание зерен: 0,98	ФКС: 65 Бейнит: 20 Мартенсит: 15	469

Окончание табл. 1

№ п/п	Скорость охлаждения, °C/c	Параметры зёрненной структуры (размеры зерна в мкм)	Параметры фазового состава, %	Твердость материала HV_{30}
5	40	Средний размер зерна: 0,25 Коэффициент вариации размера зерна: 0,03 Степень анизотропии: 1,25 Объемное содержание зерен: 0,37	ФКС: 50 Бейнит: 30 Мартенсит: 20	554
6	50	Средний размер зерна: 0,21 Коэффициент вариации размера зерна: 0,06 Степень анизотропии: 1,1 Объемное содержание зерен: 0,79	ФКС: 40 Бейнит: 30 Мартенсит: 30	617
7	60	Средний размер зерна: 0,13 Коэффициент вариации размера зерна: 0,07 Степень анизотропии: 1,08 Объемное содержание зерен: 0,91	ФКС: 10 Мартенсит: 90	800

Значения важности, использованные при построении функции расстояния, указаны в табл. 2.

Таблица 2. Значения важности при построении функции расстояния

Название параметра	ФКС	Бейнит	Мартенсит	Средний размер зерна	Коэффициент вариации размера зерна	Степень анизотропии	Объемное содержание зерен
Важность	0,3	0,4	0,5	0,7	0,6	0,6	0,8

Для указанных значений важности по формуле (3) получим матрицу расстояний между элементами:

$$(4) \quad \begin{pmatrix} 0 & 1,883 & 1,981 & 1,839 & 2,495 & 1,858 & 1,24 \\ 1,883 & 0 & 1,278 & 1,865 & 1,536 & 1,376 & 1,747 \\ 1,981 & 1,278 & 0 & 1,332 & 1,225 & 1,121 & 1,737 \\ 1,839 & 1,865 & 1,332 & 0 & 1,38 & 1,217 & 1,881 \\ 2,495 & 1,536 & 1,225 & 1,38 & 0 & 1,136 & 2,264 \\ 1,858 & 1,376 & 1,121 & 1,217 & 1,136 & 0 & 1,427 \\ 1,24 & 1,747 & 1,737 & 1,881 & 2,264 & 1,427 & 0 \end{pmatrix}$$

Сравним ее с матрицей расстояний, полученных по значениям твердости по Виккерсу. Для того чтобы значения расстояния имели один порядок, примем функцию расстояния в виде

$$(5) \quad \rho^0(x, y) = \frac{|x - y|}{225}.$$

Вычисляя расстояния между элементами, получим

$$(6) \quad \begin{pmatrix} 0 & 0,0533 & 0,16 & 0,306 & 0,684 & 0,965 & 1,77 \\ 0,0533 & 0 & 0,106 & 0,253 & 0,631 & 0,911 & 1,72 \\ 0,16 & 0,106 & 0 & 0,146 & 0,524 & 0,805 & 1,61 \\ 0,306 & 0,253 & 0,146 & 0 & 0,378 & 0,658 & 1,47 \\ 0,684 & 0,631 & 0,524 & 0,378 & 0 & 0,28 & 1,09 \\ 0,965 & 0,911 & 0,805 & 0,658 & 0,28 & 0 & 0,813 \\ 1,77 & 1,72 & 1,61 & 1,47 & 1,09 & 0,813 & 0 \end{pmatrix}$$

Сравнивая полученные матрицы, можно заметить, что полученные значения плохо согласуются.

Для сравнения вычислим расстояние Минковского по формуле [8]:

$$(7) \quad l_p(\rho^0, \rho^1) = \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N |\rho_{ij}^0 - \rho_{ij}^1|^p \right)^{1/p}.$$

Получаем значение $l_1 = 19,54$. Несоответствие мер близости в пространствах макроскопических характеристик и параметров микроструктуры в данном случае можно объяснить как значительным влиянием неопределенности исходных данных, так

и возможной недостаточной точностью экспертного выбора значений важности.

Для того чтобы улучшить согласованность функций расстояния в пространствах значений твердости образцов и параметров микроструктуры, найдем значения важностей, как решение задачи минимизации расстояния Минковского l_1 . Данная задача является задачей оптимизации функции нескольких переменных с ограничениями типа неравенств. Наличие ограничений обусловлено требованиями, предъявляемыми к значениям функций принадлежности для специальных нечетких множеств. Решение задачи с ограничениями сводится к решению задачи без ограничений методом штрафных функций [3], которая, в свою очередь, решается методом Нелдера–Мида [1].

В табл. 3 представлены значения важности, полученные при таком подходе.

Таблица 3. Значения важности

Название параметра	ФКС	Бейнит	Мар-тенсит	Средний размер зерна	Коэффициент вариации размера зерна	Степень анизотропии	Объемное содержание зерен
Важность	1,0	0,15	0	0,16	0,11	0	0

Для полученных значений важности расстояния между элементами будут равны

$$(8) \quad \begin{pmatrix} 0 & 0,594 & 0,564 & 0,641 & 0,83 & 0,888 & 0,977 \\ 0,594 & 0 & 0,295 & 0,316 & 0,427 & 0,535 & 1,02 \\ 0,564 & 0,295 & 0 & 0,203 & 0,449 & 0,518 & 1,05 \\ 0,641 & 0,316 & 0,203 & 0 & 0,378 & 0,537 & 1,14 \\ 0,83 & 0,427 & 0,449 & 0,378 & 0 & 0,28 & 1,09 \\ 0,888 & 0,535 & 0,518 & 0,537 & 0,28 & 0 & 0,981 \\ 0,977 & 1,02 & 1,05 & 1,14 & 1,09 & 0,981 & 0 \end{pmatrix}$$

Сравнивая с (6), можно заметить, что значения функции расстояния с оптимизированными значениями важности согла-

суются лучше, чем в (7). Расстояние Минковского для метрик в данном случае $l_1 = 5,43$. Однако нет возможности принять, что функции расстояния в пространствах значений твердости и параметров микроструктуры согласованы. В частности, для образца № 7 не сохраняется порядок следования элементов, т.е. элементы, располагающиеся ближе к рассматриваемому образцу по отношению к другим в пространстве значений твердости, расположены дальше в пространстве параметров микроструктуры.

Чтобы решить такое несоответствие, необходимо изменить вид функций принадлежности специальных нечетких множеств и в явном виде рассмотреть их зависимость от значений параметров микроструктуры. Предположения о виде вводимых зависимостей должно строиться на основе принятия некоторых гипотез. В рассматриваемой задаче будем считать, что важность параметров микроструктуры линейно зависит от значения доли феррито-карбидной смеси a_1 . Вид зависимости представлен в табл. 4.

Таблица 4. Вид зависимости

ФКС	Бейнит	Мартенсит	Средний размер зерна	Коэффициент вариации размера зерна	Степень анизотропии	Объемное содержание зерен
$0,9 \times \left(1 - q_1 \frac{a_1}{100}\right)$	0,2	0,1	$0,2 \times \left(1 - q_4 \frac{a_1}{100}\right)$	$0,2(1 + q_5 \times \left(\frac{a_1}{100} - 1\right))$	$0,1(1 + q_6 \times \left(\frac{a_1}{100} - 1\right))$	$0,1(1 + q_7 \times \left(\frac{a_1}{100} - 1\right))$

Для определения расстояния при таком виде значений функций принадлежности запишем функцию расстояния в виде

$$(9) \quad \rho(A, B) = \sum_{i=1}^7 \frac{\mu_i(a_1) + \mu_i(b_1)}{2} \text{Exp}(2|\mu_i(a_1) - \mu_i(b_1)|) \frac{|a_i - b_i|}{\max(|a_i|, |b_i|)}.$$

Отметим, что в случае равенства коэффициентов q_1, q_4, q_5, q_6, q_7 нулю формула (9) аналогична (3). Значения коэффициентов вычислим также из решения задачи оптимизации. Вычисленные коэффициенты представлены в табл. 5.

Таблица 5. Вычисленные коэффициенты

q_1	q_4	q_5	q_6	q_7
0,8	1,0	1,0	1,0	0,37

Полученная в результате матрица расстояний примет вид:

$$(10) \quad \begin{pmatrix} 0 & 0,679 & 0,59 & 0,595 & 0,913 & 1,0 & 1,85 \\ 0,679 & 0 & 0,323 & 0,375 & 0,415 & 0,503 & 1,47 \\ 0,59 & 0,323 & 0 & 0,233 & 0,413 & 0,529 & 1,61 \\ 0,595 & 0,375 & 0,233 & 0 & 0,391 & 0,52 & 1,6 \\ 0,913 & 0,415 & 0,413 & 0,391 & 0 & 0,28 & 1,42 \\ 1,0 & 0,503 & 0,529 & 0,52 & 0,28 & 0 & 1,18 \\ 1,85 & 1,47 & 1,61 & 1,6 & 1,42 & 1,18 & 0 \end{pmatrix}$$

Можно утверждать, что согласованность полученной функции расстояния с метрикой в пространстве значений твердости образцов стала выше, чем в случае (9). В частности, упомянутое нарушение порядка следования элементов для образца № 7 удалось исправить. Значение расстояния Минковского в данном случае равно $l_1 = 4,35$. Таким образом, использование более сложного вида функций принадлежности позволяет точнее учитывать связь параметров микроструктуры с макроскопическими характеристиками. Можно предположить, что усложнения вида зависимости функций принадлежности, основанное на их физическом смысле, позволит более точно задавать функцию расстояния в пространстве параметров микроструктуры образца.

Также необходимо дальнейшее исследование способа вычисления близости вводимой функции расстояния к метрике в пространстве макрохарактеристик. Обоснование конкретного вида должно исходить из контекста задачи, а также, насколько это возможно, иметь физический смысл.

Еще одним способом улучшить согласованность метрик может оказаться явный учет неопределенности экспериментальных данных. Несмотря на то, что влияние неопределенности неявно может учитываться при оптимизации значения расстояния за счет присваивания меньших значений важности для параметров, наиболее подверженных влиянию случайных факторов, её явный учет является более контролируемым при построении метрики на пространстве параметров микроструктуры.

Предложен оригинальный подход к решению задачи дискриминантного анализа микроструктуры исследуемого функционального материала по комплексу заданных его физико-механических характеристик с учетом нечеткости исходной информации. Приведено два способа оценки близости комплексной оценки микроструктуры к классу материалов с заданными эксплуатационными свойствами.

Приведен демонстрационный пример решения задачи дискриминантного анализа для арматурной стали, получаемой из стали марки 80P путем специальной термообработки. Показано, что предложенный подход позволяет определять принадлежность исследуемого материала к заданному классу без дополнительных измерений его физико-механических характеристик.

Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта RFMEFI58617X0055. Название совместного проекта с ЕС в рамках программы «Горизонт 2020»: «Fracture across Scales and Materials, Processes and Disciplines» Акроним проекта: «FRAMED».

Литература

1. БАНДИ Б. *Методы оптимизации. Вводный курс*: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
2. ВОЖАКОВ А.В., ГИТМАН М.Б., ФЕДОСЕЕВ С.А. *Комплексное оценивание при выборе оптимального плана производства на тактическом уровне с учетом нечетких критериев*

- риев и ограничений* // Управление большими системами. Вып. 30. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2010. – С. 164–179.
3. ЗАНГВИЛЛ У. *Нелинейное программирование. Единый подход*; пер. с англ., под ред. Е.Г. Гольдштейна. – М.: Сов. радио, 1973. – 312 с.
 4. *Исследование процесса механотермической обработки арматуры из высокоуглеродистых сталей* / М.П. БАРЫШНИКОВ, Д.К. ДОЛГИЙ, К.Ю. КУРАНОВ, М.В. ЗАЙЦЕВА // *Сталь*. – 2012. – № 2. – С. 89–97.
 5. КУРДЮМОВ Г.В., УТЕВСКИЙ Л.М., ЭНТИН Р.И. *Превращения в железе и стали*. – М.: Наука, 1977. – 238 с.
 6. ПОТАПОВ А.С. *Распознавание образов и машинное восприятие: общий подход на основе принципа минимальной длины описания*. – СПб.: Политехника. 2007. – 548 с.
 7. *Разработка интеллектуальной системы распознавания сложных микроструктур на шлифах металлов и сплавов* / С.И. ШАРЫБИН, В.Ю. СТОЛБОВ, М.Б. ГИТМАН, М.П. БАРЫШНИКОВ // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2014. – № 12. – С. 50–56.
 8. РАУШЕНБАХ Г.В. *Меры близости и сходства* // *Анализ нечисловой информации в социологических исследованиях*. – М.: Наука, 1985. – С. 169–203.
 9. STOLBOV V.Y., GITMAN M.B., SHARYBIN S.I. *Application of Intelligent Technology in Functional Materials Quality Control* // *Materials Science Forum. Materials Engineering and Technologies for Production and Processing II*. – Vol. 870. – P. 717–724.
 10. *Shape Memory Effects in alloys* / Ed. J. Perkins. – NY, London: Plenum Press, 1975. – 480 p.
 11. SHARYBIN S.I., KLYUEV A.V., STOLBOV V.YU. *Complex grain structure of metals and alloys* // *Steel in translation*. – 2013. – Vol. 43. – No 5. – P. 245–248.

COMPLEX EVALUATION OF STRENGTH PROPERTIES OF FUNCTIONAL MATERIALS BASED ON THE ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF THE SILICON-PHASE STRUCTURE

Sergei Batin, Perm National Research Polytechnic University, master student (sebatin@ya.ru).

Mikhail Gitman, Perm National Research Polytechnic University, Doctor of Science (gmb@matmod.pstu.ac.ru).

Abstract: It is considered one of the approaches to the problem of discriminant analysis of microstructures functional materials on a range of physical and mechanical properties based on the theory of fuzzy sets. The proposed approach can be used in the process of selective quality control of functional and structural materials. It is assumed that the initial data for discriminant analysis tasks can be obtained based on computer recognition in the analysis of the microstructure of the material on digital photographs of thin sections. An algorithm for solving the problem of discriminant analysis silicon-phase structures, which allows to determine the proximity of the material to one of a predetermined set of classes known structures of complex physical and mechanical characteristics. It is presented a demo application of the algorithm in analyzing microstructures on photographs microsections hardened steel with desired strength properties.

Keywords: functional materials, photographs of microsections, silicon-phase structure, problem of discriminant analysis, fuzzy sets.

УДК 519.63
ББК 34.327

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СЛЯБА КАК КОМПОНЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Алтыева М.Ч.¹

*(Липецкий государственный технический
университет, Липецк)*

В работе рассматривается процесс нагрева слябов в методических печах. Данный процесс описывает математическая модель, которая представляет собой уравнение в частных производных параболического типа, дополняемое граничными условиями 2-го и 3-го рода. Для решения поставленной задачи используется метод конечно-разностной аппроксимации.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, метод конечных разностей, метод Гаусса, методическая печь, сварочная зона.

1. Введение

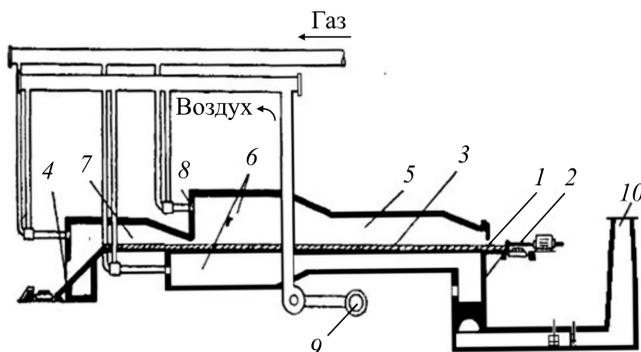
В современном мире металлы и сплавы имеют широкий круг использования, а расширенное производство заготовок и изделий из металлических материалов с термической обработкой позволяет повысить качество конечного продукта.

Построение математических моделей и моделирование технологических процессов играют большую роль в производстве какого-либо продукта [1–2]. В прокатном производстве широкое распространение для нагрева металла получили методические печи [9]. В данной работе рассматривается нагрев слябов в сварочной зоне методической печи.

¹ Марина Чарыевна Алтыева, магистрант (94marinka94@gmail.com).

2. Описание технологического процесса в методической печи

На рис. 1 изображена схема-срез методической нагревательной печи. По принципу действия методическая печь является непрерывной печью, хотя посадка в нее заготовок совершается через те или иные промежутки времени.



*Рис. 1. Схема-срез методической нагревательной печи:
1 – окно посадки металла; 2 – толкатель; 3 – металл в печи;
4 – окно выдачи металла; 5 – методическая зона;
6 – сварочная зона; 7 – томильная зона; 8 – горелка;
9 – вентилятор; 10 – дымовая труба*

Топливо сжигается при помощи горелок, а продукты сгорания движутся вдоль рабочего пространства печи в направлении, противоположном движению металла. Металл, в свою очередь, толкателем перемещается по водоохлаждаемым трубам, и через окно выдачи нагретый металл попадает на рольганг и по нему к стану.

Методическая печь имеет три теплотехнические зоны, предназначенные для разделения стадий нагрева:

♦ **методическая зона** (зона рекуперации) предназначена для утилизации тепла уходящих газов;

♦ **сварочная зона** предназначена для постепенного нагрева металла. В сварочной зоне металл имеет почти готовую для прокатки температуру;

♦ **ТОМИЛЬНАЯ ЗОНА** (зона выравнивания) предназначена для выравнивания температуры по сечению металла.

Проблемой методических печей является то, что в сварочной зоне до высоких температур нагревается только поверхность металла; температура средних слоев меньше температуры поверхности, т.е. создается перепад температур по сечению металла, недопустимый по технологическим требованиям [3, 8].

Для того чтобы предугадать развитие качественной продукции и выбрать оптимальные режимы достижения качества при минимальных затратах, необходимо смоделировать этот процесс.

3. Формализованная постановка задачи

3.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Системы дифференциальных уравнений в частных производных лежат в основе математического описания многих физических процессов [4].

Уравнение теплопроводности, которое требуется решить:

$$(1) \quad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right).$$

Данное уравнение дополняется начальным условием

$$(2) \quad T(x, y, t_0) = \phi(x, y)$$

и граничными условиями:

– для верхней поверхности сляба:

$$(3) \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \sigma \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right];$$

– для боковых граней с расчетным участком:

$$(4) \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \sigma_2 \left(\frac{T_s}{100} - \frac{T_m}{100} \right);$$

– для нижней поверхности сляба:

$$(5) \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\alpha_1 (T_s - T_T)}{1 + \left(\frac{x}{R} \right)^2} - \alpha_2 (T_s - T_m).$$

Все параметры формул представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры формул

Параметр	Пояснение
λ	коэффициент теплопроводности
x, y	координаты в пространстве
ρ	массовая плотность
C_p	удельная теплоемкость
t	время
σ, σ_2	приведенный коэффициент теплообмена излучением
T_m	температура поверхности металла
T_s	температура греющей среды
α_1, α_2	коэффициент теплопередачи
T_T	температура глиссажной трубы
R	радиус глиссажной трубы

3.2. АППРОКСИМИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для решения уравнений воспользуемся численным методом. Используем метод сеток [5–7], который обладает довольно высокой эффективностью и имеет широкое практическое применение.

Чтобы построить расчетную схему, необходимо преобразовать уравнение теплопроводности (1) и граничные условия (3)–(5):

$$(6) \quad T_{j,k}^{i+1} \left(\frac{2\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta x)^2} + \frac{2\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta y)^2} + 1 \right) - \frac{\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta x)^2} \cdot T_{j+1,k}^{i+1} - \\ - \frac{\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta x)^2} T_{j-1,k}^{i+1} - \frac{\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta y)^2} T_{j,k+1}^{i+1} - \frac{\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta y)^2} T_{j,k-1}^{i+1} = T_{j,k}^i;$$

$$(7) \quad T_{j,k}^{i+1} - T_{j,k-1}^{i+1} = \frac{\Delta y \sigma \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^2 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^2 \right]}{\lambda};$$

$$(8) \quad T_{j,k}^{i+1} - T_{j-1,k}^{i+1} = \frac{\Delta x \sigma_2 \left(\frac{T_s}{100} - \frac{T_m}{100} \right)}{\lambda};$$

$$(9) \quad T_{j,k+1}^{i+1} - T_{j,k}^{i+1} = \frac{\Delta y \alpha_1 (T_S - T_T)}{\lambda \left(1 + \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right)} - \frac{\Delta y \alpha_2 (T_S - T_m)}{\lambda}.$$

Таким образом, из уравнений (6)–(9) получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которая решается методом Гаусса:

$$(10) \quad \left\{ \begin{array}{l} T_{j,k}^{i+1} \left(\frac{2\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta x)^2} + \frac{2\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta y)^2} + 1 \right) - \frac{\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta x)^2} T_{j+1,k}^{i+1} - \\ - \frac{\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta x)^2} T_{j-1,k}^{i+1} - \frac{\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta y)^2} T_{j,k+1}^{i+1} - \frac{\tau\lambda}{\rho C_p (\Delta y)^2} T_{j,k-1}^{i+1} = T_{j,k}^i, \\ T_{j+1,k}^{i+1} - T_{j,k}^{i+1} = \frac{\Delta x \sigma_2 \left(\frac{T_S}{100} - \frac{T_m}{100} \right)}{\lambda}, \\ T_{j,k}^{i+1} - T_{j-1,k}^{i+1} = \frac{\Delta x \sigma_2 \left(\frac{T_S}{100} - \frac{T_m}{100} \right)}{\lambda}, \\ T_{j,k+1}^{i+1} - T_{j,k}^{i+1} = \frac{\Delta y \alpha_1 (T_S - T_T)}{\lambda \left(1 + \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right)} - \frac{\Delta y \alpha_2 (T_S - T_m)}{\lambda}, \\ T_{j,k}^{i+1} - T_{j,k-1}^{i+1} = \frac{\Delta y \sigma \left[\left(\frac{T_S}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right]}{\lambda}. \end{array} \right.$$

4. Исследование построенной модели нагрева сляба в методической печи

4.1. СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММЕ

Программа «Моделирование процесса нагрева слябов в методических печах» разработана в интегрированной среде Microsoft Visual Studio 2010, на языке программирования C#.

Данная программа предназначена для моделирования процесса нагрева слябов в методических печах и получения числовых и графических характеристик температурного поля за весь период нагрева. На рис. 2 показан интерфейс программы.

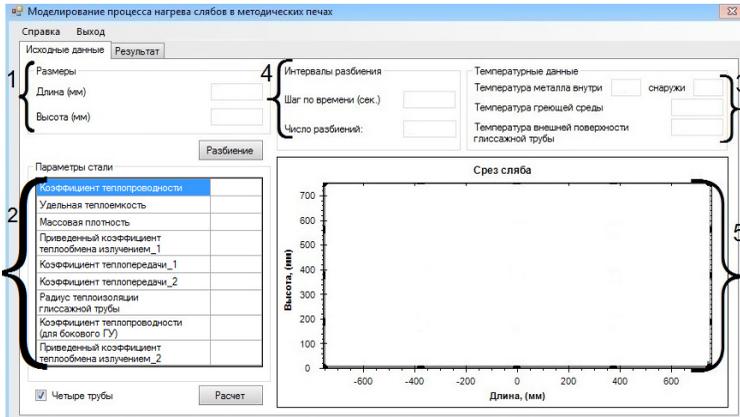


Рис. 2. Интерфейс ПО: 1 – размерности сляба; 2 – входные параметры стали; 3 – температурные данные; 4 – данные о разбиении исходной области; 5 – дискретизованная область

Перед началом работы заполняем области 1–4 и нажимаем кнопку «Расчет». Когда программа посчитает, необходимо перейти во вкладку «Результат».

4.2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для расчета введем исходные данные, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Исходные данные

Название	Ед. измерения	Значение
Длина сляба	мм	4000
Высота сляба	мм	250
Шаг по времени	с	1
Число разбиений	шт	20
Температура металла внутри	°C	1000

Окончание табл. 2

Название	Ед. измерения	Значение
Температура металла снаружи	°C	1000
Температура греющей среды	°C	1340
Температура внешней поверхности глиссажной трубы	°C	1270
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·°C)	27
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·°C)	691
Массовая плотность	кг/м ³	7662
Приведенный коэффициент теплообмена на излучением	Вт/(м ² ·K ⁴)	3,13
Коэффициент теплопередачи 1	Вт/(м ² ·K)	4,6
Коэффициент теплопередачи 2	Вт/(м ² ·K)	4,1
Радиус теплоизоляции глиссажной трубы	мм	150
Коэффициент теплопроводности (для бокового ГУ)	Вт/(м·°C)	21
Приведенный коэффициент теплообмена на излучением 2	Вт/(м ² ·K ⁴)	2,73

На рис. 3 представлен результат работы программы, здесь показано температурное поле сляба при выходе из сварочной зоны.

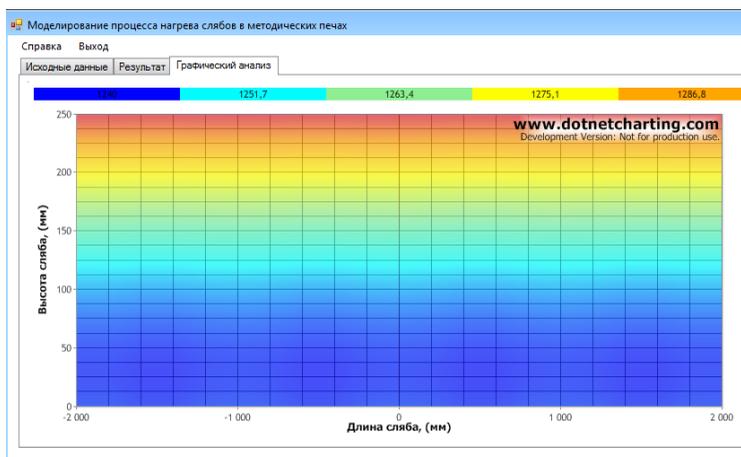


Рис. 3. Результат работы ПО

По результатам вычислений ПО разница температур между нижней и верхней поверхностью составила 46 °С, что обеспечивает необходимые условия технологического процесса, при которых перепад температур после нагрева в сварочной зоне печи должен находиться в интервале 40–50 °С.

5. Выводы

На основе построенной математической модели, разработанного программного обеспечения и при известных параметрах стали имеется возможность моделировать процесс нагрева сляба в сварочной зоне методической печи.

Исходя из полученных результатов моделирования существует возможность выбора режимов работы печи, обеспечивающих минимальный перепад температур по сечению металла.

Таким образом, с помощью предварительного расчета модель дает возможность подобрать оптимальное значение температур, позволяющее снизить термические напряжения в заготовке, тем самым повышая качество конечного продукта.

Литература

1. ГАЛКИН А.В., КУЗИНА Н.Е., ПИМЕНОВ В.А. *Математическое моделирование теплового режима процесса остывания и затвердевания слитка в УНРС* [Электронный ресурс] // Управление большими системами (УБС'2014): материалы XI Всерос. школы-конф. молодых ученых, 9–12 сент. 2014 г., Арзамас / Ин-т проблем управ. им. В.А. Трапезникова; Арзамас. политехн. ин-т Нижегород. гос. техн. ун-та; под общ. ред. Д.А. Новикова, П.В. Пакшина. – Электрон. текстовые дан. (108 файл: 78,8 Мб). – М.: ИПУ РАН, 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 961–972.
2. ГАЛКИН А.В., ФИЛИППОВ Д.А., ПИМЕНОВ В.А. *Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния сляба в УНРС* [Электронный ресурс] // Управление большими системами (УБС'2015): материалы XII Всерос. школы-конф. молодых ученых, 7–11 сент. 2015 г., Волгоград / Ин-т проблем управ. им. В.А. Трапезникова; Волго-

- град. гос. ун-т; под общ. ред. Д.А. Новикова, А.А. Воронина. – Электрон. текстовые дан. (104 файла: 110 Мб). – М.: ИПУ РАН, 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 600–611.
3. ГУБИНСКИЙ В.И. *Металлургические печи*. – Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 83 с.
 4. ДРУЖИНИН Г.М., САМОЙЛОВИЧ Ю.А., ПОПОВ Е.В. *Способы снижения термической неоднородности массивных стальных слябов при нагреве в методических нагревательных печах* // Черная металлургия. – 2013. – № 7. – С. 27–32.
 5. МЕРКУЛОВА Н.Н., МИХАЙЛОВ М.Д. *Разностные схемы для обыкновенных дифференциальных уравнений: учеб. пособие*. – Томск: Изд-во ТГУ, 2014. – 122 с.
 6. САМАРСКИЙ А.А., ГУЛИН А.В. *Численные методы: учеб. пособие для вузов*. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
 7. САМАРСКИЙ А.А. *Теория разностных схем*. – М.: Наука, 1977. – 657 с.
 8. СЕВЕРИН Т.С. *Обоснование параметров автоматизированного управления нагревом слитков в методической трехзонной печи: автореф. магистра*. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 20 с.
 9. ТАЙЦ Н.Ю., РОЗЕНГАРТ Ю.И. *Методические нагревательные печи*. – 2-е, испр. и доп. – М: Металлургиздат, 1964. – 410 с.

MATHEMATICAL MODELING THE PROCESS OF SLAB HEATING AS COMPONENT OF PRODUCTION CONTROL

Marina Altyeva, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, master student (94marinka94@gmail.com).

Abstract: this paper describes modeling the process of slab heating in continuous furnaces. The process is described using mathematical model consisting of parabolical type partial derivative equation with second and third type boundary conditions. The finite-difference approximation is used to solve the problem.

Keywords: heat equation, finite-difference method, Gaussian elimination, continuous furnace, heating section.

УДК 621.7.019.7
ББК 78.34

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ СТАЛИ В КОНВЕРТЕРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Некрасова Д.А.¹

*(Липецкий государственный технический университет,
Липецк)*

В данной работе приведены математические модели для расчета массы и химического состава стали и шлака в сталеплавильном производстве в зависимости от массы и химического состава загруженных материалов (чугун, металлический лом, известь, доломит и т.д.), а также параметров работы конвертера. Оценивается точность полученных моделей с помощью коэффициента детерминации и стандартных ошибок моделей.

Ключевые слова: балансовая модель, регрессионная модель, конвертер, коэффициент детерминации.

1. Введение

По мере развития технологии производства стали повышаются требования к качеству продукции. Математические модели дают возможность эффективно управлять процессами.

Наиболее распространенным способом производства стали является кислородно-конвертерный процесс. Сущность данного процесса заключается в том, что в конвертер заливают жидкий чугун, загружают металлический лом, различные добавки и продувают снизу воздухом. Таким образом, кислород окисляет примеси чугуна, в результате чего он превращается в сталь. При этом выгорают примеси чугуна – углерод, крем-

¹ Дарья Алексеевна Некрасова, студентка (brezhneva.darya.pm12@mail.ru).

ний, марганец, сера, фосфор, а продукты реакции переходят в шлак или в газ [5]. Металлический лом используется для охлаждения, так как при окислительных реакциях тепла выделяется больше, чем требуется. Для формирования шлака применяются известь.

Главной задачей управления конвертерной плавкой является получение заданного химического состава и температуры стали при минимальных затратах топливно-энергетических ресурсов, при этом необходимо учитывать возможности производственных факторов процесса [3].

2. Параметры модели

Введем функцию

$$(1) \quad y = f(v, x),$$

где y – выход (химический состав стали);

v – химический состав загруженных материалов;

x – факторы внутреннего состояния процесса.

Основными шихтовыми материалами кислородно-конвертерного процесса являются жидкий чугун, стальной лом, шлакообразующие (известь, доломит, известняк и т.д.):

$$(2) \quad m = m_c + m_l + m_{шл},$$

где m – масса шихтовки (т); m_c – масса чугуна (т); m_l – масса металлического лома (т); $m_{шл}$ – масса шлакообразующих (т).

Для стали и чугуна рассматриваются следующие химические элементы: Fe, C, S, P, Mn. Расчет массы химического элемента производится с помощью формулы:

$$(3) \quad m_i = Q_c m_c + Q_l m_l + Q_{шл} m_{шл},$$

где m_i – масса i химического элемента на входе; $Q_c, Q_l, Q_{шл}$ – процентное содержание химического элемента в чугуне, металлическом ломе и шлакообразующих соответственно.

В табл. 1 представлены входящие факторы и факторы внутреннего состояния, которые использовались в модели.

Таблица 1. Факторы модели

Входы	
Химический состав чугуна, %	C Mn S P Fe
Температура чугуна, °C	$T_ч$
Масса чугуна, т	$m_ч$
Сорт лома: Лом первого сорта, %	Fe C P S
Масса лома, т	$m_л$
Химический состав извести, %	CaO MgO SiO ₂ S
Масса извести, т	$m_и$
Химический состав доломита, %	CaO MgO
Масса доломита, т	$m_д$
Факторы внутреннего состояния процесса	
Расход кислорода на пл., м ³	$Q_о$
Время продувки, мин	τ
Стойкость футеровки, пл.	Ф

3. Модель для расчета химического состава стали

Для определения химического состава стали предполагалось, что содержание химического элемента зависит от входящих параметров и факторов внутреннего состояния процесса. Изначальный набор факторов включает в себя: массу химического элемента на входе, факторы внутреннего состояния процесса, массу шлакообразующих и температуру чугуна.

Модели были построены с помощью регрессионного анализа. Объем выборки – 1830 строк. Коэффициенты регрессии находились с помощью метода наименьших квадратов. С помощью *t*-критерия оценивалась значимость коэффициентов и исключались из модели факторы, рассчитанное значение *t*-критерия которых меньше табличного. Линейные регрессионные модели упрощают проектирование по сравнению с другими методами, а доступность вычислений дает прозрачность моделирования [1].

Содержание железа в стали зависит от массы железа на входе

$$(4) \quad m(\text{Fe}) = 0,94916m_{\text{Fe}},$$

где $m(\text{Fe})$ – масса железа в стали.

Для С, Р, S и Mn содержание в стали зависит и от параметров внутреннего состояния:

$$(5) \quad m(\text{C}) = (3,0\Phi + 8,0Q_o - 36,0T_q) \cdot 10^{-6} + 0,007915m_{\text{C}},$$

$$(6) \quad m(\text{S}) = (1,0\Phi + 1,0Q_o) \cdot 10^{-6} + 0,510368m_{\text{S}},$$

$$(7) \quad m(\text{Mn}) = 0,246732m_{\text{Mn}} + (770,0T_q - 6,0m_{\text{ул}}) \cdot 10^{-6},$$

$$(8) \quad m(\text{P}) = 0,101364m_{\text{P}} + (1,0Q_o - 0,497m_{\text{ул}}) \cdot 10^{-6}.$$

Построенные модели имеют высокий коэффициент детерминации, что говорит о высоком качестве моделей.

Таблица 2. Коэффициенты детерминации для полученных моделей

Химический элемент в стали	Точность модели, %
Fe	99,9
C	92,8
S	91,8
Mn	95
P	89,4

С помощью критерия Стьюдента произведена оценка коэффициентов. Табличное значение критерия со степенями свободы $n - k - 1$, где n – объем выборки и k – количество факторов, и уровне значимости $\alpha = 0,05$ в полученных моделях меньше рассчитанного значения критерия, что подтверждает значимость факторов полученного уравнения (табл. 3).

Таблица 3. Оценка коэффициентов модели с помощью *t*-критерия

Фактор	Коэффициент	$t_{\text{практ}}$	$t_{\text{теор}} (\alpha = 0,05)$
С			
m_c	0,007915	5,84324	1,961265
Φ	$3 \cdot 10^{-6}$	8,52682	
Q_o	$8 \cdot 10^{-6}$	6,7073	
$T_{\text{ч}}$	$-3,6 \cdot 10^{-5}$	-5,25395	
S			
m_s	0,510368	35,99595	1,961264
Φ	$1 \cdot 10^{-6}$	7,47085	
Q_o	$1 \cdot 10^{-6}$	14,87136	
Mn			
m_{Mn}	0,246732	25,81942	1,961264
$m_{\text{шл}}$	$-6 \cdot 10^{-6}$	-9,51052	
$T_{\text{ч}}$	$-7,7 \cdot 10^{-4}$	13,29565	
P			
m_p	0,101364	8,34597	1,961264
$m_{\text{шл}}$	$-4,97 \cdot 10^{-7}$	-7,75813	
Q_o	$1 \cdot 10^{-6}$	7,99958	

4. Модель для расчета температуры стали

Важнейшим критерием качества стали является температура. Модель отражает зависимость температуры стали от температуры жидкого чугуна и факторов внутреннего состояния:

$$(9) \quad T_{\kappa} = 7,21163m_c - 0,003070m_{\text{шл}} + 0,002830\Phi + \\ + 0,484679T_{\text{ч}} + 1,374633\tau,$$

где T_{κ} – температура стали (°C); $T_{\text{ч}}$ – температура чугуна (°C).

Коэффициент детерминации для полученной модели: $R^2 = 0,9999$. Оценка коэффициентов модели для температуры стали производилась с помощью критерия Стьюдента с вероятностью $\alpha = 0,05$ (табл. 4).

Таблица 4. Оценка коэффициентов модели с помощью *t*-критерия

Фактор	Коэффициент	$t_{\text{практ}}$	$t_{\text{теор}} (\alpha = 0,05)$
m_q	7,21163	37,41933	1,961264
$m_{\text{шл}}$	-0,0307	-7,3485	
Φ	0,00283	6,34125	
T_q	0,484679	21,63649	
τ	1,374633	2,08779	

Исходя из результатов исследования, получаем, что на химический состав стали влияют содержание химического элемента на входе и факторы внутреннего состояния – время продукции, стойкость футеровки и расход кислорода.

Литература

1. АЙВАЗЯН С.А., МХИТРЯН В.С. *Прикладная статистика и основы эконометрики*. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 320 с.
2. БАПТИЗМАНСКИЙ В.И. *Теория кислородно-конвертерного процесса*. – М.: Металлургия, 1975 с. 375.
3. БИГЕЕВ А.М. *Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов*. – М.: Металлургия, 1982. – 156 с.
4. БИГЕЕВ А.М., КОЛЕСНИКОВ Ю.А. *Основы математического описания и расчеты кислородно-конвертерных процессов*. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
5. ВОСКОБОЙНИКОВ В.Г., КУДРИН В.А., ЯКУШЕВ А.М. *Общая металлургия*. – М.: Академкнига, 2005. – 768 с.

CHEMICAL FORECASTING IN CONVERTER PRODUCTION

Nekrasova Darya Alexeevna, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk, student (brezhneva.darya.pm12@mail.ru).

Abstract: in this work we presented mathematical models to calculate the mass and chemical composition of steel and slag in the steelmaking process-based on the mass and chemical composition of loaded materials (cast iron, metal scrap, limestone, dolomite, etc.) as well as the operating parameters of the Converter. The estimated accuracy of the obtained models is using the coefficient of determination and standard errors.

Keywords: balance model, regression model, Converter, coefficient of determination.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К МОНИТОРИНГУ КИБЕРУГРОЗ В АСУ ТП ТРАНСПОРТА ГАЗА

Спиридонов С.В.¹

(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
РАН, Москва)

В статье рассматривается один из возможных подходов к построению комплексной системы информационной безопасности и обеспечения технологического процесса газотранспортных предприятий на базе систем класса SIEM.

Ключевые слова: информационная безопасность, SIEM, технологический процесс, транспорт газа, АСУ ТП.

1. Введение

Последствия одной из наиболее ранних кибератак (обнаружена в 2010 г.) на производственные площадки заключались в срыве (замедлении) государственной ядерной программы Ирана посредством атаки на контроллеры и программное обеспечение (ПО) SCADA фирмы Siemens, используемые в установках по обогащению урана (центрифугах) [5]. По мнению экспертов, уровень исполнения атаки и средств ее проведения указывает на высокую квалификацию создателей и вероятную принадлежность их к неким государственным структурам. Также обращает на себя внимание факт заявления большинства ведущих технологических государств о создании кибервойск не только под эгидой обеспечения кибербезопасности государства, но и открытые заявления некоторых о проведении работ по созданию наступательного кибероружия и приравнивания кибератаки на собственную инфраструктуру к акту агрессии. Внедрение «закладок» в аппаратное и программное обеспечение на

¹ Сергей Владимирович Спиридонов, научный сотрудник (ssv@ipu.ru).

уровне спецслужб не только для шпионажа, но и для проведения диверсионных действий является вполне естественной практикой.

К наиболее поздним событиям можно отнести атаку на энергосистему Украины в 2016 г., отличительной особенностью которой считается многообразие применяемых методов (фишинг, 0-day и т.д.) и уровень координации атакующих. Данная атака считается первой успешно проведенной на электроэнергетические сети целого государства.

Немаловажным фактором является угроза применения кибероружия террористами, хотя их уровень материально-технического оснащения не может конкурировать с технологически развитыми странами.

С другой стороны, атаки на инфраструктуру открывают широкие возможности и для «обычных» киберпреступников, зарабатывающих шантажом с использованием «шифровальщиков». Если для пользовательских систем это уже давно является обыденностью, то стали появляться примеры шантажа инфраструктурных объектов, например медицинского центра Голливуда в Лос-Анджелесе (2016 г.).

В результате прослеживается достаточно четкий вектор развития подобных угроз, превратившийся из «страшилок» в текущую действительность с возможностью нанесения серьезного урона государственного масштаба или для достижения необходимого заказчику эффекта (включая репутационный). Это подтверждается постоянно увеличивающимся количеством подобных атак и уровнем их исполнения, что выводит область защиты информации на новый уровень.

2. Особенности ИБ в АСУ ТП транспортом газа

Автоматизированное производство (или технологический процесс) можно представить как взаимосвязь человека и «машины» посредством человеко-машинного интерфейса (НМИ), и самым слабым звеном в этой связке является человек. В результате научно-технического прогресса (НТП) эта разница будет только увеличиваться, делая человека все менее значимым элементом системы. Конечным результатом такого НТП будет

создание автоматических систем управления, отличительной особенностью которых будет не только реальное время, но и максимально предельные режимы функционирования системы с управлением на новых принципах. В таком случае роль информации будет главенствующей, с соответствующим уровнем предъявляемых к ней требований.

Одним из ключевых моментов функционирования автоматизированной системы управления (АСУ) ТП является способность качественной обработки необходимой информации для реализации эффективного управления, и этот подход является доминирующим в настоящее время. Качественная обработка информации подразумевает выполнение предъявляемых к ней требований, например, таких как надежность, своевременность, актуальность и т.д. [1]. Таким образом, оптимальное управление напрямую зависит от получаемой информации о технологическом процессе, своевременной выработке управляющих воздействий и способности довести управляющее воздействие непосредственно до исполнителя (им может быть как человек, так и механизм).

Организация газотранспортного предприятия с точки зрения сетевого взаимодействия можно разделить на несколько частей, из которых можно выделить сеть для производственно-хозяйственной деятельности (ПХД) и сеть АСУ ТП.

Сеть АСУ ТП включает в себя технологическую сеть автоматизации исполнения и контроля. На данном уровне организации циркулирует служебная информация, необходимая для управления и контроля технологического объекта, что подразумевает доступ к критически важной информации SCADA-систем и исполнительных механизмов.

Информационная безопасность технологической инфраструктуры (сеть АСУ ТП) объекта и связанных с ним систем представляется многоуровневой и эшелонированной. Ключевым моментом проектирования и реализации политики ИБ является способность интерпретировать угрозы, оценивать риски, прослеживать и предсказывать развитие векторов атаки с использованием различных программно-технических средств [СТО]. Данный подход подразумевает контроль (с точки зрения ИБ) над информацией, но с учетом первостепенной задачи АСУ ТП – управления технологическим процессом.

3. Использование SIEM в АСУ ТП

ИБ является неотъемлемой частью АСУ ТП. Для безопасного управления ТП необходимо иметь не только информацию о протекающем процессе, но и адекватную оценку состояния информационной защиты всех элементов АСУ ТП [2, 3]. Такой подход позволит более адекватно реагировать на различные инциденты как технологического характера, так и ИБ. Реализация подобного функционала представляется наиболее эффективной в части оперативно-диспетчерского управления с отображением на рабочем месте диспетчера (с соответствующим уровнем абстракции в части ИБ). Альтернативный вариант – отображение технологической информации у специалиста ИБ, что представляется проигрышным по ряду причин, например из-за непонимания технологического процесса или уровня ответственности (за ТП ответственность несет диспетчерская служба).

К вопросу о необходимом и достаточном уровне абстракции представления данных ИБ для диспетчера АСУ ТП. Во-первых, что и в каком виде должно отображаться. Диспетчер не является специалистом в ИБ, и аналогичное отображение событий ему больше навредит, чем поможет, следовательно, ему необходим адекватный его квалификации метод оценки и классификации событий. Для этого можно воспользоваться подходом, широко применяемым в системах типа SIEM (Security Information and Event Management) для ИБ [4]. Общий смысл заключается в ранжировании событий на основе правил корреляции с учетом возможности их классификации. Правила корреляции позволяют в достаточно удобной форме описать взаимосвязь между событиями и присвоить им необходимый статус или классифицировать, например, классифицируя совокупность различных методов атаки на устройство как опасное для ТП с соответствующим отображением у диспетчера. Кроме того, подобный подход позволяет оценивать и действия самого диспетчера. Во-вторых, речь идет о способе отображения этой информации. Здесь видится три варианта: отображение в SCADA в виде отдельного приложения или создание единого HMI. С учетом развития пользовательских интерфейсов на базе web-технологий (большинство SIEM имеет настраиваемый web-интерфейс)

можно предположить направление развития в области единого НИИ как наиболее перспективное.

В качестве реализации такого подхода предлагается использовать SIEM как наиболее развитый механизм для анализа информации в области ИБ. Отличительной особенностью подобных систем является не только фактическая констатация факта, но и выявление скрытых угроз, распределенных во времени (advanced persistent threat) посредством использования прогрессивных методик обработки и классификации информации на базе методов big data и data mining, что также позволяет работать и с технологической информацией.

4. Выводы

На отдельных предприятиях начат процесс внедрения SIEM (ООО «Газпром трансгаз Москва»), однако без корреляции с событиями в предметной области. Предлагается существенно расширить границы использования SIEM. Собирая данные с различных систем АСУ ТП, нормативно справочных систем, можно построить систему обработки, классификации, корреляции и анализа элементарных событий, которая приведет к получению качественно новых данных. Эти данные в дальнейшем используются для выявления многих процессов, связанных не только с собственно ИБ, но и с безопасностью в целом, в том числе с экономической безопасностью.

Поскольку предприятия и объекты ОАО «Газпром» имеют сложную распределенную структуру и широкое многообразие IT-систем и АСУ ТП, которые необходимо защищать от внешних внутренних угроз, представляется целесообразным обратить внимание на системы типа SIEM и структуры быстрого реагирования CERT. Обеспечив таким инструментарием иерархию предприятий, объектов и систем ПАО «Газпром» и создав высококвалифицированную группу быстрого реагирования типа CERT в ее вершине, можно достичь высокого уровня предупреждения, обнаружения и отражения кибер-атак, что позволит предприятию избежать экономических и материальных потерь.

Литература

1. КОСТОГРЫЗОВ А.И., ЛАЗАРЕВ В.М., ЛЮБИМОВ А.Е. *Прогнозирование рисков для обеспечения эффективности систем информационной безопасности в их жизненном цикле* // Правовая информатика. – 2013. – № 4. – С 4–16.
2. СТО Газпром 4.2-1-001-2009. Система обеспечения информационной безопасности ОАО «Газпром». Основные термины и определения.
3. СТО Газпром 4.2-3-002-2009. Требования по технической защите информации при использовании информационных технологий.
4. <https://www2.cs.arizona.edu/~collberg/Teaching/466-566/2012/Resources/presentations/2012/topic9-final/report.pdf> (accessed at 20 July 2017).
5. *Enhancing SIEM Technology to Protect Critical Infrastructures* / L. Coppolino, S. D'Antonio, V. Formicola, L. Romano // Critical Information Infrastructures Security 7th International Workshop, CRITIS 2012, Lillehammer, Norway, September 17–18, 2012. – P. 10–21.

ONE APPROACH TO THE CYBER SECURITY MONITORING IN THE GAS TRANSPORT MANAGEMENT SYSTEM

Sergey Spiridonov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, (ssv@ipu.ru).

Abstract: The article considers one of the possible approaches to the construction of an integrated information security system and the provision of technological process for gas transport based on SIEM class systems.

Keywords: cyber security, SIEM, technological process, gas transport, automated process control system.

УДК 004.057.4
ББК 30в6

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ Q-ROUTING

Якимова А.П.¹

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

В статье разрабатывается имитационная модель протокола маршрутизации Q-Routing. Представлено описание алгоритма маршрутизации на узле сети передачи данных с использованием естественного языка и языка онтологий OWL. По предложенной онтологии разработана имитационная модель протокола в среде моделирования AnyLogic.

Ключевые слова: беспроводные сети, имитационное моделирование, онтология сети связи, протокол маршрутизации, AnyLogic, Q-routing.

1. Введение

Одним из перспективных направлений развития современных сетей связи является создание мобильных беспроводных ad-hoc сетей. Отсутствие заранее построенной инфраструктуры обмена данными позволяет организовать такие сети для решения различных задач, подбирая наиболее удобную конфигурацию для каждой индивидуально. Примером таких сетей связи являются: сети мобильных устройств (Manet), выстраивающих взаимодействие между собой для передачи какой-либо информации; сети транспортных средств; промышленные сенсорные сети (Wireless sensor networks); сети интернета вещей (Internet of Things). Для достижения эффективного взаимодействия узлов в распределённой сети используются протоколы динамической

¹ Алена Павловна Якимова, студентка (jkimovaalena@yandex.ru).

маршрутизации, вовлекающие в процесс передачи не только оконечные узлы сети, но и ряд промежуточных узлов для обеспечения наискорейшей доставки данных и покрытия большой территории. Одним из наиболее распространённых является протокол Q-routing, в основе которого лежит самообучающийся алгоритм маршрутизации [3]. Отмеченное актуализирует задачу построения модели протокола маршрутизации и исследования её сетевых характеристик.

2. Алгоритм маршрутизации Q-Routing

Основу алгоритма маршрутизации Q-Routing составляет способ экспериментального машинного обучения (Q-learning) узлов при взаимодействии с сетью. Узел, передавая данные адресату через соседние узлы сети, получает информацию о значении полезности Q данного пути, выражаемой показателем предполагаемой остаточной задержки доставки данных до конечного узла. Это впоследствии позволяет узлам сети аргументированно выбирать путь отправки данных.

Для построения таблиц маршрутизации узлы сети работают согласно следующему алгоритму. Узел-источник S передаёт данные узлу-получателю D . При прохождении данных через сеть узел X решает осуществлять передачу данных через промежуточный узел Y . В этом случае алгоритм маршрутизации включает следующие этапы [2].

1) Узел X выбирает пакет для передачи (дисциплина выбора FIFO).

2) Узел X выбирает наилучший следующий узел Y по Q -таблице маршрутизации. Критерием выбора является минимальная остаточная задержка передачи доставки до конечного узла D . Для определения Q -задержки анализируется строка таблицы, адрес конечного узла которой совпадает с D . Анализируются поля строки, и выбирается ячейка с минимальной задержкой. Столбец ячейки показывает адрес узла Y (табл. 1).

3) Узел X осуществляет передачу пакета узлу Y .

4) Узел Y выбирает из таблицы маршрутизации минимальную предполагаемую Q_{YDZ} -задержку длительности перехода пакета в конечный узел D через последующий узел Z .

Таблица 1. Q-таблица маршрутизации узла X (пример D=2)

Получатель D	Сосед Y			
	Y ₁	Y ₂	...	Y _k
1	7.0	3.5	4.0	2.3
2	3.2	1.4	5.8	2.5
...
N	5.7	4.3	3.9	6.1

5) Узел Y отвечает узлу X (FIFO) пакетом со значением задержки Q_Y .

6) Узел X принимает актуальное значение задержки Q_{YDZ} доставки и вычисляет промежуточное значение задержки передачи пакета от X к D через Y:

$$(1) \quad Q_{XDY}^{est} = q + s + Q_{YDZ},$$

где q – задержка в текущем узле; s – расстояние между узлами S и D.

7) Узел X рассчитывает новое значение предполагаемой остаточной задержки доставки пакета и записывает его в определенное место Q-таблицы:

$$(2) \quad Q_{XDY}^{new} = Q_{XDY}^{old} + \eta \cdot (Q_{XDY}^{est} - Q_{XDY}^{old}),$$

где η – параметр скорости обучения в сети (learning rate parameter).

3. Разработка модели

3.1. ОНТОЛОГИЯ СЕТИ

Построение имитационных моделей сложных систем, в частности и сети с исследуемым протоколом маршрутизации, в настоящее время целесообразно с применением агентного моделирования, основу которого составляет концепция объектно-ориентированного программирования (ООП). Применение данного подхода за счёт уменьшения степени абстракции моделируемого объекта позволяет создавать понятные, легко разрабатываемые и адекватные за счёт учёта множества параметров функционирования, масштабируемые и исследуемые модели [1].

Одной из распространённых сред, обладающих указанными свойствами, является среда AnyLogic. Основными недостатками применения агентного подхода являются высокие временные затраты на разработку, а также сложность и громоздкость структур модели. Для решения этих задач разработке имитационной модели должно предшествовать описание модели на языке, близком к имитационному. Проработка архитектуры разрабатываемой модели, первичное определение структуры модели, её классов и свойственных им параметров, методов работы способствуют значительному сокращению времени разработки модели, сокращению числа допускаемых при разработке моделей ошибок и повышению корректности модели в целом. Представление указанного описания исследуемого объекта возможно, целесообразно и выполняется в работе с использованием языка описания онтологий (OWL), работающего также в концепции ООП. Согласно концепции онтология сети с исследуемым протоколом маршрутизации Q-routing представлена на рис. 1.

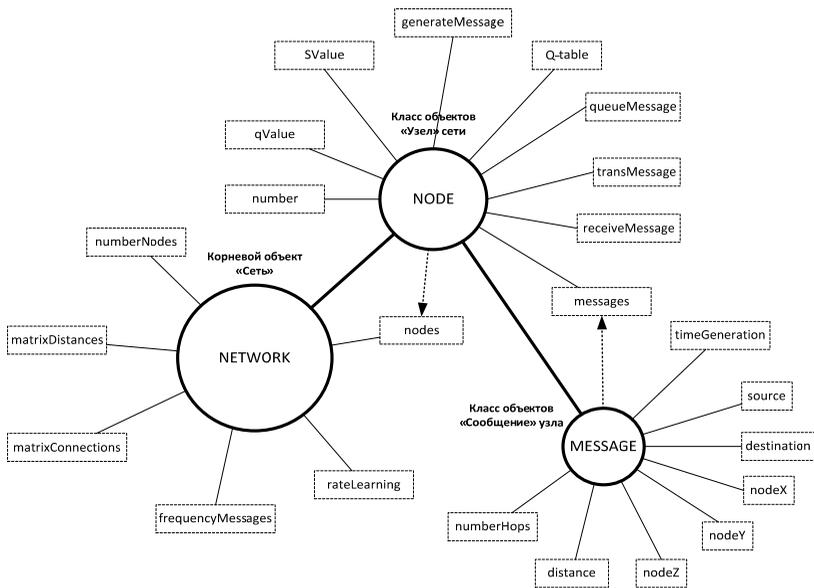


Рис. 1. Онтология сети с маршрутизацией Q-routing

Описание модели сети включает в состав три основных класса объектов: сеть Network, узел Node, сообщение Message. В составе исследуемой сети связи определены следующие параметры (табл. 2).

Таблица 2. Параметры сети

Имя параметра	Предназначение параметра
numberNodes	Количество узлов в анализируемой сети
matrixDistances	Матрица дистанций между узлами сети
matrixConnections	Матрица связности узлов (соседей) сети
frequencyMessages	Частота формирования сообщений узлом сети
rateLearning	Скорость обучения узлов сети
arrayNodes	Массив узлов сети

Основной класс сети «Узел» описывается параметрами и объектами, представленными в табл. 3.

Таблица 3. Параметры узла

Имя параметра	Предназначение параметра
Number	Номер (индекс) данного узла
qValue	Индивидуальная задержка обработки узла
sValue	Расстояние между узлами S и D
generateMessage	Генерация сообщений
Q-table	Q-таблица задержек узла
queueMessage	Очередь сообщений на передачу
transMessage	Передаваемое сообщение
receiveMessage	Принимаемое сообщение
arrayMessages	Массив принимаемых и передаваемых сообщений узла

Класс «Сообщение» сети характеризуется параметрами, указанными в табл. 4.

Представленное OWL-описание архитектуры исследуемой сети реализовано в виде модели в среде имитационного моделирования AnyLogic. Модель детализирована диаграммами состояний и переходов (state chart), реализующими логику получения, обработки и отправки сообщений в сеть.

Таблица 4. Параметры сообщения

Имя параметра	Предназначение параметра
timeGeneration	Модельное время формирования сообщения
source	Номер узла отправителя сообщения
destination	Номер узла получателя сообщения
nodeX	Номер промежуточного узла-отправителя
nodeY	Номер промежуточного узла-получателя
nodeZ	Номер последующего узла
distance	Пройденное сообщением расстояние по сети
numberHops	Количество совершённых сообщением прыжков через узлы

3.2. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СЕТИ

Разработка модели протокола маршрутизации Q-Routing начинается с иерархически верхнего элемента – сети и далее продолжается для вложенных объектов: узлов, составляющих сеть, и сообщений, передаваемых между узлами. Разработка модели производится путем создания классов указанных элементов (объектов, агентов), представляющих собой общую структуру, параметры и методы обработки ими событий.

Элемент модели сеть Network в AnyLogic создан структурой одиночного агента, включающей набор основных параметров: скорость обучения, частота формирования сообщений, количество узлов в сети, матрица соединений (связей) узлов, а также матрица дистанций между узлами.

Узлы сети моделируются как агенты пользовательского класса Node, структура которого включает в себя ряд индивидуальных параметров и диаграммы передачи и приема сообщений. К параметрам узлов относятся: номер узла, значение задержки в текущем узле, расстояние между узлом-отправителем и узлом-получателем, Q-таблица, очередь сообщений, передаваемое и принимаемое сообщения. По ходу функционирования модели узлом производится генерация сообщений с заданной частотой.

Класс сообщений передаваемых по сети между узлами представлен простой структурой, включающей время генерации сообщения, его источник и получатель, промежуточные отпра-

вители и получатели, количество хопов (прыжков), а также пройденное расстояние.

Основное внимание при разработке модели уделено созданию диаграмм передачи и приема сообщений узлом сети (рис. 2).

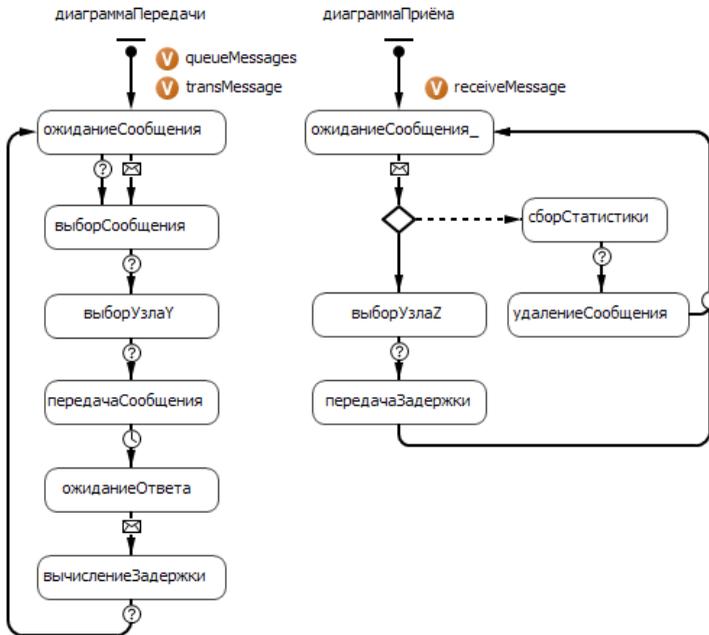


Рис. 2. Диаграммы приема и передачи сообщений узлом сети

Диаграмма передачи сообщения реализует алгоритм, представленный в п. 2 и описывается следующим набором состояний узла и переходов между ними (рис. 2).

1. Исходным состоянием является ожидание сообщения, в котором находится узел, если очередь сообщений на передачу к этому узлу пуста. Выход из состояния возможен в двух случаях: при получении нового сообщения и при наличии сообщения в очереди на передачу.

2. Критерием выбора сообщения для передачи является порядок их поступления в систему (дисциплина выбора FIFO), по-

сле чего осуществляется переход в следующее состояние для выбора промежуточного узла-получателя Y .

3. Выбор промежуточного узла-получателя Y происходит по Q -таблице узла, передающего сообщение. При этом проверяется вся строчка таблицы для заданного конечного получателя, а дальнейшая передача сообщения производится через узел с минимальным значением метрики.

4. Передача сообщения производится путем удаления сообщения из очереди на передачу данного узла и занесением его в очередь узла-получателя сообщения.

5. Состояние ожидания ответа необходимо для получения значения задержки передачи сообщения через узел Y . Переход в следующее состояние производится при получении данного ответа. При этом производится расчет промежуточного значения задержки передачи сообщения от узла-передатчика к получателю через узел Y .

6. В состоянии вычисления задержки выполняется расчёт нового значения предполагаемой остаточной задержки доставки сообщения и запись его в Q -таблицу. После этого система возвращается в начальное состояние ожидания сообщения.

Диаграмма приема сообщения реализует алгоритм, также представленный в п. 2, и описывается следующим набором состояний узла и переходов между ними (см. рис. 2).

1. В исходном состоянии узел ожидает приёма сообщения. Выход из состояния производится при получении нового сообщения. При этом переход сопровождается проверкой совпадения адреса получателя сообщения и адреса текущего узла. В случае совпадения адресов выполняется переход к состоянию сбора статистики, удаления принимаемого сообщения и возврат к начальному состоянию. В ином случае выполняется переход в состояние выбора следующего узла-получателя.

2. Выбор промежуточного узла-получателя Z происходит по Q -таблице. При этом проверяется вся строчка таблицы для заданного конечного получателя, а дальнейшая передача сообщения будет производиться через узел с минимальным значением метрики.

3. В состоянии передачи задержки осуществляется формирование ответа узлу-отправителю об актуальном значении

q -задержки. После передачи диаграмма переходит в начальное состояние.

Представленное описание реализовано в модели программно с использованием простых приёмов объектно-ориентированного программирования Java работы с объектами модели, массивами, параметрами, переменными.

4. Результаты

В статье разработана имитационная модель протокола маршрутизации Q-Routing. Представлено описание анализируемого алгоритма маршрутизации на узле сети передачи данных с использованием естественного языка и языка онтологий OWL. По предложенной онтологии разработана имитационная модель протокола в среде моделирования AnyLogic. Особое внимание уделено созданию диаграмм передачи и приёма сообщений, реализующих модель алгоритма маршрутизации.

В настоящий момент ведётся проработка вопросов построения процедур сбора и расчёта статистических данных для оценки эффективности работы модели протокола маршрутизации Q-routing и сравнения её с другими известными протоколами, а также проведения анализа влияния параметров протокола, в частности скорости обучения, на сетевые характеристики.

Литература

1. ДАДЕНКОВ С.А., КОН Е.Л. *Анализ моделей и методов агентного и дискретно-событийного имитационного моделирования // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ.* – 2015. – № 5. – С. 35–41.
2. ШИЛОВА Ю.А., КАВАЛЕРОВ М.В. *Исследование влияния параметра скорости обучения на результаты работы алгоритма маршрутизации q-routing // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика.* – 2015. – С. 172–179.
3. BOYAN JUSTIN A., LITTMAN MICHAEL L. *Packet routing in dynamically changing networks: a reinforcement learning approach // Advances in neural information processing systems.* – 1994. – P. 671–678.

DEVELOPMENT OF THE Q-ROUTING ROUTING PROTOCOL MODEL

Alyona Yakimova, Perm National Research Polytechnic University,
Perm, student (jkimovaalena@yandex.ru).

Abstract: The article develops a simulation model of the routing protocol q-routing. The description of the routing algorithm on the node of the data transmission network using the natural language and ontology language owl is presented. According to the proposed ontology, a simulation model of the protocol was developed in the Anylogic modeling environment.

Keywords: wireless networks, simulation modeling, communication network ontology, routing protocol, Anylogic, q-routing.

УДК 004.057.4
ББК 30в6

МОДЕЛЬ ПРОТОКОЛА ПОИСКОВОГО СЕРВИСА DHT

Даденков С.А.¹, Ибрагимов Р.Р.²
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)

В статье разрабатывается имитационная модель децентрализованной P2P-сети с протоколом поискового сервиса DHT. Приводится естественное и онтологическое описание работы протокола DHT. Предлагается имитационная модель P2P-сети с протоколом DHT в среде моделирования AnyLogic, позволяющая оценивать результативность поиска данных.

Ключевые слова: протоколы поиска данных, централизованные и децентрализованные протоколы, BitTorrent, DHT, P2P.

1. Введение

Распространенность протоколов поиска информации в современных сетях связи обусловлена востребованностью получения больших объемов данных миллионами устройств и пользователей глобальной информационной сети. С ростом масштабов сетей связи снижается эффективность применения традиционных централизованных архитектур и протоколов поиска информации. Это обусловлено высокой стоимостью централизованных систем хранения данных, низкой отказоустойчивостью, недостаточной пропускной способностью каналов связи для передачи и обработки больших объёмов данных. Распространённость получают децентрализованные системы хранения и протоколы поиска данных, и в частности, протокол поискового сервиса DHT (Distributed Hash Table) [2, 1].

¹ Сергей Александрович Даденков, кандидат технических наук (dadenkov@rambler.ru).

² Ринат Рамилевич Ибрагимов, студент (rinat_ibragimov95@mail.ru).

Недостаточность исследований применения данного протокола и влияния его параметров на результативность поиска не позволяют создавать и поддерживать эффективность функционирования децентрализованных систем хранения данных. Указанное актуализирует решение задачи построения имитационной модели протокола поискового сервиса DHT и исследования влияния его параметров на результативность поиска и нагрузку на сеть связи.

2. Протокол DHT поиска данных в P2P-сети

DHT (распределённая хеш-таблица) – это класс децентрализованных распределённых систем поискового сервиса, работающего по технологии хеш-таблиц, представляющих собой ассоциативный массив записей идентификаторов (ключей) и адресов узлов сети. Особенность технологии заключается в возможности распределения информации среди некоторого набора узлов P2P-сети [3] таким образом, что каждый участвующий узел смог бы найти искомые данные, связанные с ключами в сети (идентификаторами других узлов). Ответственность за поддержание связей распределяется между узлами, что обеспечивает простое масштабирование DHT. DHT работает на прикладном уровне и позволяет участникам файлообмена узнать друг о друге, а также найти узлы – хранители искомых данных [2, 1].

Алгоритм работы протокола поиска DHT включает последовательности подключения пользователя к сети, поиска, размещения и распространения информации в сети.

2.1 СЦЕНАРИЙ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ К СЕТИ

Сценарий подключения нового пользователя к сети включает 1) выбор уникального идентификатора компьютерного узла hashID из 160-битного пространства с помощью хеш-функции SHA-1 из IP-адреса и дополнительной информации (имени компьютера, MAC-адреса сетевой карты и пр.); 2) заполнение индивидуальной DHT-таблицы узла случайными существующими в сети идентификаторами узлов и соответствующими им адресами (IP: port). Для заполнения DHT-таблицы записями узел обращается с запросом к серверу-координатору (например,

router.utorrent.com) с запросом на получение ограниченного числа k записей, составляющих одну корзину таблицы. Корзиной называется область адресов таблицы, состоящая из k записей, при этом первая запись таблицы является ключом корзины. Разбиение таблицы на корзины с ключами необходимо для организации наискорейшего поиска узлов в сети и производится каждый раз при изменении таблицы (см. п. 2.2). Это единственная фаза взаимодействия узла сети с центральным сервером-координатором. После получения K записей они упорядочиваются в порядке возрастания десятичных чисел и вносятся в таблицу, а пользователь повторно формирует запрос для каждого из вновь полученных адресов на получение данных об известных ему случайных K узлах. Так продолжается до тех пор, пока размер таблицы узла не превысит минимального объёма таблицы V .

2.2 СЦЕНАРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ И ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ

Для размещения и поиска данных в сети ДНТ используется уникальный идентификатор информационной раздачи infoHash. Для размещения данных и организации доступа узлов сети владелец файла должен определить M «представителей» данных, которые будут знать об источнике данных. Представители выбираются по принципу наибольшей близости их hashID к infoHash-данным. Данный механизм обеспечивает высокую вероятность доступности, низкое время поиска информации и нагрузку на сеть даже в случае неактивности ряда узлов сети. Принцип выбора «ближайших» узлов заключается в их итеративном поиске по ДНТ-таблице. Число итераций поиска M «представителей» ограничено значением Q . Каждая итерация представляет собой выбор узлов корзины, наиболее близкой к искомому infoHash, и формирование запроса на получение новых K -записей (корзины) из таблиц запрашиваемых узлов, также наиболее близких к искомому infoHash. Ближайшей называется адрес или корзина, адрес которой имеет наименьшее расстояние (десятичную разницу) hashID и infoHash-данных (ближайшая корзина определяется по попаданию в её адресное пространство infoHash-данных). По результатам поиска узлам-представителям ближайшей корзины отправляется сообще-

ние об известности идентификатора узла, раздающего данные и infoHash его данных. Данная процедура при определённых значениях параметров обеспечивает высокую вероятность нахождения данных узлов-представителей и узла-источника с данными по infoHash данных.

Процедура поиска данных в сети аналогична процедуре размещения и сводится к итеративному поиску и заполнению таблицы DHT новыми записями об hashID узлов, чьи адреса ближе всего к искомому infoHash. С каждой итерацией поиска увеличивается вероятность нахождения узлов, обладающих информацией об infoHash искомым данным.

Одной из проблем функционирования DHT-сети является нарушение активности узлов в сети. Это наблюдается при неактивности узлов в случае отсутствия подключения к сети, при смене адреса и в других ситуациях и приводит к снижению вероятности успешного поиска информации в сети. Для обработки таких ситуаций в DHT-таблице определяется состояние каждого узла: 1) актуальный – узел, от которого получено сообщение или ответ за последний контрольный период времени T ; 2) сомнительный – узел, связь с которым отсутствует на протяжении времени T ; 3) не актуальный – узел, не отвечающий на запросы в течение нескольких периодов опроса, допускается исключение данных о таком узле из DHT-таблицы. Таким образом, записи DHT-таблицы сохраняют свою актуальность при работе в сети. Ввиду сложности моделирования сценариев потери актуальности данный аспект в работе не анализируется.

3. Разработка модели

Построение современной имитационной модели сложной системы целесообразно с применением концепции объектно-ориентированного программирования (ООП). Это способствует повышению детализации модели учётом значимых факторов функционирования объекта и повышению точности результатов моделирования. Однако разработка корректной имитационной модели очень сложна и поэтому должна выполняться не только на основе естественного описания объекта моделирования. Раз-

работке имитационной модели должно предшествовать описание модели на языке, близком к имитационному. Проработка архитектуры разрабатываемой модели, первичное определение структуры модели, её классов и объектов, свойственных им параметров, методов работы (в том числе диаграмм состояний и переходов, процессных диаграмм) способствует значительному сокращению времени разработки модели, сокращению числа допускаемых при разработке моделей ошибок и повышению корректности модели в целом. Представление указанного описания исследуемого объекта выполняется в работе с использованием языка описания онтологий (OWL). Разработанная онтология DHT-сети представлена на рис. 1.

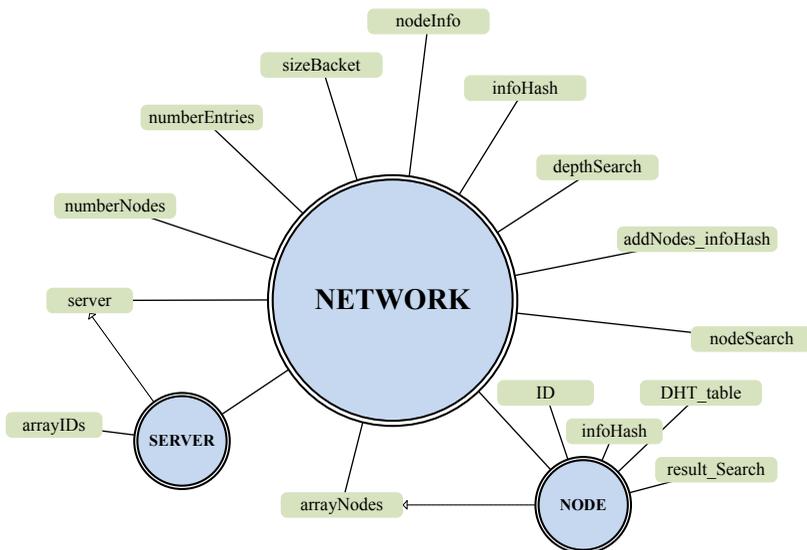


Рис. 1. Онтология DHT-сети

Онтология сети показывает связи ключевых объектов модели DHT-сети. Каждый объект характеризуется индивидуальными параметрами, определяющими функционирование и характеристики сети. Основными объектами модели являются: 1) корневой объект сети Network; 2) сервер Server; 3) узлы класса Node.

Моделируемая сеть описывается параметрами: `numberNodes` – количество узлов DHT-сети; `arrayNodes` – массив узлов сети; `numberEntries` – минимальное число записей DHT-таблицы; `sizeBacKet` – размер корзины; `nodeInfo` – узел источник информации; `infoHash` – идентификатор искомых данных; `depthSearch` – глубина поиска, количество итераций поиска; `addNodes_infoHash` – параметр, подразумевающий добавление новых идентификаторов узлов в DHT-таблицу, чьи ID более близки к `Infohash`; `nodeSearch` – узел, осуществляющий поиск данных. Сервер сети включает массив для хранения ассоциативной таблицы `hashID` узлов сети и соответствующих им индексов в массиве `arrayNodes`. Класс узлов сети описывается параметрами: идентификатор ID (`hashID`); идентификатор данных узла `infoHash`; DHT-таблица `DHT_Table`; коллекция с результатами поиска `result_Search`.

Для исследования протокола DHT согласно представленной онтологии создана имитационная модель сети в среде имитационного моделирования `AnuLogic` на основе языка программирования `Java`. Основной интерфейс модели показан на рис. 2.

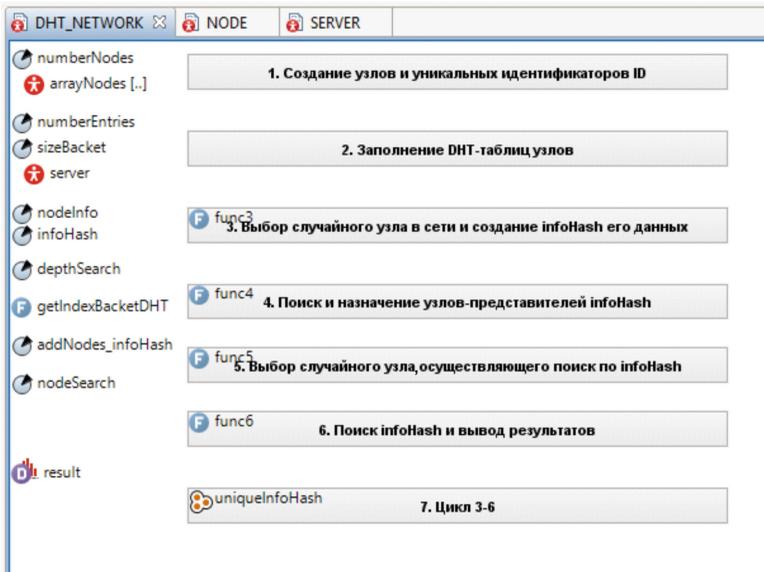


Рис. 2. Интерфейс модели P2P-сети с протоколом DHT

Для удобства использования проработаны программные способы ручной и автоматизированной работы с моделью. Работа с моделью выполняется по этапам.

1. Создание узлов и их уникальных идентификаторов hashID. Процедура выполняется в цикле, где создаются объекты класса узел (Node), добавляются в массив `arrayNodes`, а их идентификаторы определяются с использованием алгоритма хеширования SHA-1 (от `hashCode` объекта) из подключенной библиотеки `commons-codec-1.7`. В массив объекта сервер записывается ассоциация hashID и индекса узла в массиве `arrayNodes`.

2. Заполнение DHT-таблиц узлов. Процедура выполняется в цикле, где для каждого узла DHT-таблица заполняется `numberEntries` необходимым минимальным числом записей с сервера. Процедура в модели упрощена по сравнению с представленным в п. 2.1 алгоритмом, но не влияет на результат случайного выбора идентификаторов узлов сети. Сложность этапа заключается в необходимости сортировки записей в DHT-таблице по возрастанию значений, что потребовало пересортировки таблицы класса `ArrayList` путём её промежуточного преобразования в таблицу класса `TreeSet`.

3. Выбор случайного узла `nodeInfo` в сети и создание случайного `infoHash` его данных.

4. Поиск и назначение узлов – представителей `infoHash`. Программа на данном этапе реализует итеративный поиск узлов представителей по известному `infoHash` данных согласно процедуре, представленной в п. 2.2.

5. Выбор случайного узла `nodeSearch`, осуществляющего поиск данных по `infoHash`. Программа на данном этапе выбирает случайный узел, который должен осуществлять поиск данных по известному `infoHash`.

6. Поиск `infoHash` и вывод результатов. Процедура проводится аналогично этапу 4 по сценарию п. 2.2. В качестве результатов выводится число узлов, обладающих информацией о искомым данных.

Пример использования модели представлен на рис. 3.

Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами

```

1. Создание узлов и уникальных идентификаторов ID: 0.964s
2. Заполнение DHT-таблиц узлов: 24.605s
3. Выбор узла и HashID его данных: 0.0s
   nodeInfo index |16904|
   IDnode   |cfd7f5304faba5aefcd9a071983251a6b4a87cde|
   infoHash |74c19690cb1978a8e8ca746551cfc8f2bf3da759|
4. Поиск представителей данных по infoHash:
   Итерация №0
   75ecb5b01e035ac5f40cee30e1b53770599c542d
   75ee5f69b636db73811f08eabe031a4ba0434d9b
   7605274b88eee4f7c5c1a046c200b092d7fdb81b
   767fbac71d2364b918b1cfc428bcadd75e0dc0b
   76866393e7bec2a5ec1c33b8412ae09a003bba9b
   77972d64ca1b9942b28f3847a23a4433c5f59ba
...
   Итерация №3. Итоговое назначение представителей HashID-данных:
   |38949| |74caf3c72489afdc53e4ccfa5d6fff5e785bfdc| ... Ok
   |10244| |74d492ecf8c10e613a01a4d7f93302a23af0ac7a| ... Ok
   |33729| |74d5cf97acfbe4ca8cc4aa0917e99ca2211cfc4d| ... Ok
   |9954| |74da14ab1f83f7fc19fd6fff6c3af3ebce73a9c5c| ... Ok
   |31260| |74dec0bcbcfb7430b346beae79e8cf99b4db4414| ... Ok
   |42369| |74eae7f93893e07e7f3f1d7d026fcd44c0998fad| ... Ok
   infoHash <74c19690cb1978a8e8ca746551cfc8f2bf3da759> успешно назначен выбранным представителем
6. Выбор случайного узла осуществляющего поиск по infoHash: 0.0s
   nodeSearch index |42341|
   IDnode   |af78798d55c7049be7e6a1e508d70b36ad866069|
   infoHash |74c19690cb1978a8e8ca746551cfc8f2bf3da759|
7. Поиск infoHash и вывод результатов:
   Итерация №0.      Результаты
   745e89e539b1c7288dc7aae62cd32f6b1e2a96fb      NO
   748c0b277092ee277e5ecaeaed2d291d965c0db73      NO
   750db456d9391b0a53013c6a19c7007deac2b48a      NO
   757d6abd8ca4b9beee1eb3035fa8789e0ca88652      NO
   76753d5f5d80a25650fefde2f60e05214eed846f      NO
   76cb466da488264ce15ab8ea8123924a4b6ee6d1      NO
...
   Итерация №3.      Результаты
   |27927| |750ac89a057c0f933c4dc52912272a1a2af54350|      NO
   |28358| |750d6e9bc16e0ed88c52267cba4e2259b01c049c|      NO
   |42722| |750db456d9391b0a53013c6a19c7007deac2b48a|      NO
   |2364| |75179be6d9646c0be44fdd9361d8d1b8c59eaf5d|      NO
   |8838| |751a3af2b4f50f392eddb303c4e4356c95e2d198|      NO
   |44680| |751e6b8f0882e40ef6360fc337eaa24ed3736167|      NO
   РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА: 2 записей.
   <74dec0bcbcfb7430b346beae79e8cf99b4db4414>
   <74eae7f93893e07e7f3f1d7d026fcd44c0998fad>

```

Рис. 3. Результаты моделирования P2P-сети с DHT-протоколом

Преимуществом пошагового управления моделью является возможность анализа и интерпретации полученных результатов. Необходимость автоматизированного моделирования обусловлена важностью получения статистических результатов о результативности поиска информации в зависимости от параметров сети и протокола. Программа автоматизированно моделирования воспроизводит 1000-кратный цикл воспроизведения процедуры поиска различных данных в сети и, на-

капливая статистику, выводит данные о результативности. Ограничение числа циклов поиска данных за один запуск модели связано с изменением (расширением) DHT-таблиц узлов, что приводит к изменению исходных параметров модели сети и оказывает влияние на результаты моделирования.

4. Результаты

Для исследования протокола DHT в работе построена онтология P2P-сети, которая использована при построении имитационной модели сети с анализируемым протоколом поискового сервиса. Представленная модель в настоящее время используется для исследования результативности поиска данных в сети с различными сетевыми и протокольными параметрами: число узлов в сети, число записей в DHT-таблице, ёмкость корзины, глубина поиска. Конечной целью проводимого анализа является оптимизация характеристик протокола поискового сервиса для заданных исходных данных.

Литература

1. СИВАЩЕНКО Д. *Распределённые хэши-таблицы на примере NoSQL СУБД Cassandra*. – URL: <http://seminar.at.ispras.ru/wp-content/uploads/2010/11/Cassandra-and-DHT.pdf> (accessed at 25 July 2017).
2. LOEWENSTERN A. *DHT Protocol*. URL: http://www.bittorrent.org/beps/bep_0005.html (assecced at 25 July 2017).
3. *MONI NAOR, UDI WIEDER*. Novel Architectures for P2P Applications: the ContinuousDiscrete Approach. Proc. SPAA, 2003. – URL: http://research.microsoft.com/pubs/73859/dhpaper_final_hp.pdf (assecced at 25 July 2017).

MODEL PROTOCOL SEARCH SERVICE DHT

Sergey Dadenkov, Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Cand.Sc. (dadenkov@rambler.ru).

Rinat Ibragimov, Perm National Research Polytechnic University,
Perm, student (rinat_ibragimov95@mail.ru).

Abstract: The paper describes a simulation model of a decentralized P2P network Protocol search service DHT. Is a natural and ontological description of the work of the DHT Protocol. The simulation model of a P2P network with a DHT Protocol in the simulation environment AnyLogic, which allows to evaluate the performance of data retrieval.

Keywords: protocols, data retrieval, centralized and decentralized protocols, BitTorrent, DHT, P2P.

УДК 681.518 + 004.05
ББК 30в6

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОТОКОЛА СЛУЧАЙНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА P-PERSISTENT CSMA

Даденков С.А.¹, Кон Е.Л.², Харюшина К.И.³
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)

Выполняется построение имитационной модели вероятностного р-настойчивого протокола CSMA множественного доступа узлов сети к разделяемой среде передачи информации. Анализируются разновидности протокола p-Persistent CSMA со статическим и динамическим уровнем настойчивости на основе прогнозирования нагрузки на канал передачи.

Ключевые слова: протоколы случайного множественного доступа p-CSMA, коллизии, загруженность канала связи.

1. Введение

Решение задачи организации множественного доступа узлов к каналу в сетях с разделяемой средой передачи выполняется с помощью вероятностных и детерминированных методов доступа. Вероятностные методы позволяют более эффективно использовать сетевой канал при передаче спорадического трафика, а детерминированные методы – при передаче регулярного трафика. Использование детерминированных методов является целесообразным для обеспечения вероятностно-временных характеристик систем жесткого реального времени, в то время как

¹ Сергей Александрович Даденков, кандидат технических наук (dadenkov@rambler.ru).

² Ефим Львович Кон, кандидат технических наук (kel-40@yandex.ru).

³ Кристина Ивановна Харюшина, студентка (kharushina.christina@gmail.com).

вероятностные методы могут обеспечить меньшее время передачи (при условии небольшой полезной загруженности канала с множественным соперничеством или высокой загруженностью без соперничества), служить основой организации систем мягкого реального времени. Поэтому применение вероятностных методов множественного доступа CSMA (Carrier Sense Multiple Access) получило широкое распространение в локально-вычислительных сетях, сетях доступа Ethernet (FE, GE, xGE, TE), транспортных сетях Metro Ethernet (ME), беспроводных сетях связи. В настоящее время методы множественного доступа активно применяются для построения промышленных сетей реального времени: Industrial Ethernet (IE), CAN, LonWorks, ModbusTCP и др. В указанных сетях связи используются различные разновидности протоколов семейства CSMA, которые эффективны в различных условиях эксплуатации: при определённом количестве узлов в сети, загруженности канала связи, характере информационной нагрузки и проч. Широкая распространённость протоколов множественного доступа, а также рост требований к быстродействию сетевых систем актуализирует решение задачи построения моделей протоколов множественного доступа CSMA и оценки их вероятностных и временных характеристик передачи информации.

Одним из основных критериев классификации протоколов множественного доступа с контролем несущей является признак настойчивости передающих устройств (при наличии у них информации для передачи). Все разновидности являются частным случаем общего алгоритма с p -уровнем настойчивости (p -Persistent, p -CSMA), где p – вероятность начала передачи сетевым устройством, имеющим информацию, сразу по освобождении канала. Настойчивые протоколы доступа 1-CSMA характеризуются передачей информации сразу же после освобождения канала. Протокол с ненастойчивым поведением характеризуется проверкой занятости канала и в случае занятости откладыванием попытки проверки канала и передачи на случайный интервал времени. Отдельно от указанных, абсолютно настойчивых и ненастойчивых, протоколов выделяют алгоритмы с вероятностным уровнем настойчивости, обеспечиваемым случайной за-

держкой передачи с момента освобождения канала. Результаты известных исследований показывают преимущества протокола при спорадическом характере трафика [3, 6]. В настоящей работе анализируется и производится построение модели двух разновидностей вероятностного p -CSMA протокола со статическим и динамическим уровнем настойчивости на основе прогнозирования нагрузки на канал передачи (predictive p -persistent CSMA).

2. Алгоритм доступа p -Persistent CSMA

Доступ узлов к сетевому каналу по протоколу p -Persistent производится в синхронных пакетных циклах [3–5]. Циклы подразделяются на свободные, когда канал свободен, и занятые, когда выполняется передача. Каждый занятый пакетный цикл представляет собой время доступа к каналу и время передачи пакета данных.

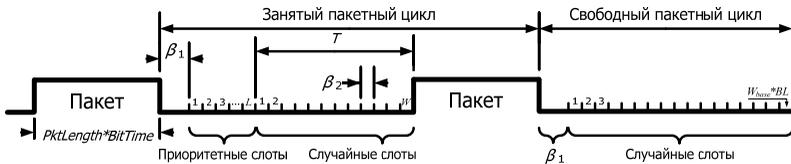


Рис. 1. Алгоритм доступа и передачи p -Persistent CSMA

Алгоритм доступа к среде включает следующие основные этапы (рис. 1) [5, 2, 4]:

- 1) Проверка активности в сетевом канале.
- 2) Фиксированный межпакетный интервал β_1 .
- 3) Фиксированный для узла приоритетный интервал, равный числу слотов доступа l , каждый продолжительностью β_2 .

4) Случайный интервал доступа для каждого узла, равный случайному числу слотов доступа продолжительностью β_2 , выбранных по равномерному распределению из окна доступа, шириной $W = [0..W_b \cdot BL - 1]$. W_b – базовая ширина соревновательного окна (базовое количество слотов доступа), равного по стандарту 16 временным слотам. Backlog (BL) – прогнозируемая на канал нагрузка, изменяемая по результатам успешных (–1) и неудачных (+1) передач, регулирующая ширину W окна дос-

тупа, уменьшающая вероятность коллизии с ростом нагрузки на канал. Отличительной чертой алгоритма без прогнозирования (no predictive) является постоянный уровень настойчивости, обеспечиваемый отсутствием механизма прогнозирования с сохранением постоянного значения нагрузки backlog, равного 1.

Узел с минимальным суммарным временем доступа считается выигравшим в соперничестве за канал и осуществляет передачу пакета с задержкой, равной частному от деления размера пакета на скорость передачи в сети. При одновременной передаче несколькими узлами происходит коллизия. Возможность повторной передачи после коллизии определяется сервисом доставки сообщений вышележащего транспортного уровня стека протоколов. В настоящей работе анализируется сервис ненадёжной доставки, поэтому все сообщения, участвующие в коллизии, повторно не передаются, т.е. теряются. В таком случае вероятность потери передаваемого сообщения равна вероятности коллизии [2].

3. Разработка модели

Разработка имитационной модели протокола множественного доступа *p*-CSMA в сети связи выполняется в системе имитационного моделирования AnyLogic. Выбор системы обусловлен простотой, наглядностью и гибкостью разработки модели с использованием языка объектно-ориентированного программирования Java и развитой совокупностью элементов дискретно-событийного моделирования процессов и событий [1].

Разработка модели сети связи с протоколом множественного доступа традиционно осуществляется, начиная с иерархически верхнего элемента сети – канала связи и далее продолжается для вложенных объектов узлов, входящих в состав канала, и сообщений, принадлежащих определённым узлам. Построение объектно-ориентированной модели производится путем разработки классов указанных элементов (объектов-агентов), представляемых набором параметров, методов, диаграмм передачи и обработки информации и событий. При этом создание конкретных экземпляров указанных классов (определённых узлов, сообщений) производится в рамках запуска и функционирования модели.

Элемент модели «Канал» в AnyLogic создан структурой одиночного корневого агента, который представляется набором параметров: количество и коллекция узлов-агентов, интенсивность генерации сообщений узлом сети, скорость передачи по каналу и параметры доступа протоколов (β_1 , β_2), служебные параметры (состояние канала, обнаружение коллизии и др.).

Узлы сети моделируются агентами пользовательского класса «Узел», структура которых включает ряд свойственных им параметров и диаграмм доступа к разделяемой среде передачи информации. Параметры узлов: коллекция сообщений для передачи по сети, выбранное количество случайных слотов доступа, величина прогнозируемой нагрузки backlog.

Класс сообщений, передаваемых по сети между узлами, представлен простой структурой, включающей на данном этапе разработки модели, отметку времени появления сообщения и значение его размера.

Основное внимание при разработке модели уделено разработке диаграммы доступа узлов сети к разделяемой среде передачи.

С помощью события «ГенерацияСообщения» в модели производится формирование в случайные моменты времени новых сообщений для передачи другим узлам сети. При этом выполняется определение параметров сообщений, таких как адреса отправителя и получателя, время формирования сообщения и др.

Диаграмма доступа реализует алгоритм, представленный в п. 2, и описывается следующим набором состояний и переходов между ними (рис. 2):

1. Исходным состоянием «НачалоЦикла» диаграммы является начало пакетного цикла. Узел осуществляет коррекцию значения счётчика прогнозируемой нагрузки backlog на канал связи на новый пакетный цикл в зависимости от результата предыдущей передачи и разновидности протокола CSMA. Переход в следующее состояние производится по истечении интервала времени межпакетной передачи β_1 (*PackageInterval*).

2. Продолжение доступа к каналу для передачи выполняется при условии наличия у узла объекта-сообщения (*Message*) для передачи, генерируемого с использованием события «ГенерацияСообщения». В ином случае узел переходит в состояние ожидания принятия («Приём») сообщения из канала связи.

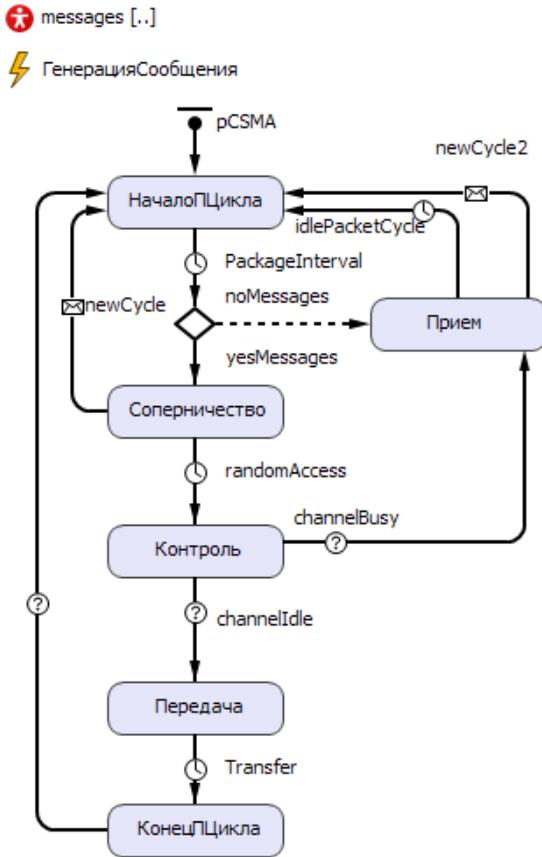


Рис. 2. Диаграмма доступа p-Persistent CSMA

3. Состояние ожидания приёма необходимо для перевода узла в состояние неактивной передачи с ожиданием завершения пакетного цикла либо по истечении времени свободного пакетного цикла («idlePacketCycle») с отсутствием активности в канале связи, равного времени ожидания всех слотов доступа $W \cdot BL$, либо по завершении занятого пакетного цикла.

4. Узел, имеющий сообщение для передачи, начинает соперничество за канал связи и выбирает случайное количество слотов доступа из ширины окна, после чего выжидает соответствующую задержку доступа («randomAccess»).

5. В состоянии «Контроль» узел прослушивает среду и определяет возможность начала передачи. В случае обнаружения несущей в канале связи (по параметру состояния канала) узел переходит по связи «*channelBusy*» в состояние приёма сообщения, откладывая передачу до следующего пакетного цикла, в ином случае продолжает пакетный цикл и переходит по связи «*channelIdle*», где в зависимости от числа узлов, выбравших равное число слотов доступа, выявляется факт коллизии передачи в канале.

6. Состояние «*Передача*» и переход «*Transfer*» моделируют процесс и временную задержку передачи объекта сообщения узлу-получателю.

7. В состоянии завершения пакетного цикла собирается статистика по результативности и задержке передачи сообщения, а также отправляется модельное сообщение узлам сети для входа узлов в новый синхронный пакетный цикл. В рамках данного состояния в зависимости от сервиса передачи данных выполняется различная обработка сообщений. В случае передачи без подтверждения исходное сообщение удаляется независимо от результата передачи, а при сервисе с подтверждением сохраняется с пометкой передачи до момента получения подтверждения. В случае использования сервиса с подтверждением и коллизии передачи в следующий пакетный цикл осуществляется повторная попытка передачи сообщения определённое число раз.

Представленное описание реализовано в модели программно, с использованием простых приёмов объектно-ориентированного программирования Java работы с объектами модели, массивами, параметрами, переменными.

4. Результаты

В работе предложена модель сети с протоколом случайного множественного доступа *p*-Persistent CSMA, позволяющая выполнять оценку вероятности и задержки успешной передачи данных в сети. С использованием предложенной модели запланировано проведение исследований протоколов

доступа, анализа влияния протокольных параметров на надежность и время передачи данных. Для достижения поставленной цели необходимо решение ряда следующих важных задач.

1. Определение оптимальной базовой ширины окна доступа протоколов в зависимости от загруженности канала передачи и диапазонов её изменения.

2. Определение области эффективности алгоритмов передачи с прогнозированием и без прогнозирования нагрузки на канал по критериям времени задержки и вероятности доставки данных.

3. Анализ эффективности алгоритма прогнозирования нагрузки для различных сервисов доставки данных.

4. Анализ эффективности применения типовых законов распределения случайного числа временных слотов доступа.

Литература

1. ДАДЕНКОВ С.А., КОН Е.Л. *Анализ моделей и методов агентного и дискретно-событийного имитационного моделирования // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2015. – № 5. – С. 35–41.
2. ДИТРИХ Д., ЛОЙ Д., ШВАЙНЦЕР Г.Ю. *LON-технология, построение распределенных приложений / пер. с нем.; под ред. О.Б. Низамутдинова*. – Пермь: Звезда, 1999. – 242 с.
3. КРЫЛОВ В.В., САМОХВАЛОВА С.С. *Теория телеграфика и ее приложения*. – СПб.: БХВ, 2005. – 288 с.
4. ТИРШ Ф. *Введение в технологию LonWorks*. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 143 с.
5. *LonTalk protocol specification: ANSI/CEA-709.1-B*. – United States, 2006.
6. MIŚKOWICZ M. *Analysis of Mean Access Delay in Variable-Window CSMA // Sensors*. – Kraków, Poland: MDPI, 2007.

CREATION MODEL OF THE PROTOCOL MULTIPLE ACCESS P-PERSISTENT CSMA

Sergey Dadenkov, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Cand.Sc. (dadenkov@rambler.ru).

Efim Kon, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Cand.Sc. (kel-40@yandex.ru).

Christina Kharyushina, Perm National Research Polytechnic University, Perm, student (kharushina.christina@gmail.com).

Abstract: In article creation of imitating model of the probabilistic p-persistent CSMA protocol of multiple access of knots of network to the divided information transfer environment is carried out. Kinds of the p-Persistent CSMA protocol with the static and dynamic level of persistence on the basis of forecasting of load of the channel of transfer are analyzed.

Keywords: protocols of casual multiple access of p-CSMA, collision, load of a communication channel.

ОПТИМИЗАЦИЯ LUT FPGA НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВЕНГЕРСКОГО МЕТОДА

А.С. Никитин¹, Р.В. Вихорев², А.Ю. Скорнякова³

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Получены оценки сложности конфигурируемых логических элементов, реализующих системы функций. Анализируются и сравниваются варианты реализации элементов. С целью выбора оптимального набора элементов для различных параметров систем логических функций предлагается модификация венгерского метода реализации.

Ключевые слова: логические элементы, системы логических функций, оценки сложности, оптимизация, венгерский метод

1. Введение

В программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС, FPGA) широко используются конфигурируемые логические элементы [2]. Основой таких элементов является устройство, называемое в англоязычной литературе LUT (Look Up Table), так как оно реализует задаваемую (загружаемую) таблицу истинности логической функции. Классическое значение количества переменных $n = 4$. В настоящее время в так называемых адаптивных логических модулях (АЛМ) реализованы LUT с изменяемой разрядностью до 6 переменных, в том числе имеется возможность реализации некоторых логических функций 7

¹ Алексей Сергеевич Никитин, студент (siriousbiz@ya.ru).

² Руслан Владимирович Вихорев, аспирант (vihrusvla@mail.ru).

³ Александра Юрьевна Скорнякова, аспирант (juris-plot@mail.ru).

и даже 8 переменных [1]. Функции реализуются в совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ). Существующие принципы реализации систем m логических функций от одних n переменных предполагают использование m LUT. В статье рассматриваются оценки сложности предложенных конфигурируемых логических элементов, реализующих системы функций в СДНФ и в ДНФ, в том числе ориентированных на самосинхронные схемы (ССС) [6]. Предлагается подход к выбору оптимального набора логических элементов с использованием венгерского метода.

2. Оценка сложности LUT

Сложность LUT [2, 1] в количестве транзисторов без декомпозиции (до $n = 4$) имеет вид

$$(1) \quad L_n = 2^n \cdot 8 + 2^{n+1} + 6n.$$

Однако с учётом ограничений Мида–Конвей [7] при декомпозиции сложного дерева по k -LUT, $k \in \{1, 2, 3, 4\}$, $n > k$, n :

$$(2) \quad L_{n,k} = 2^{\lfloor n \rfloor} \cdot 8 + (2^{\lfloor k \rfloor + 1} + 6 \lfloor k \rfloor) \cdot \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \rfloor} 2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor i \rfloor \cdot \lfloor k \rfloor} + \\ + (2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \rfloor \cdot \lfloor k \rfloor + 1} + 6 \cdot \left(\lfloor n \rfloor - \left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor \cdot \lfloor k \rfloor \right)) + 6 \lfloor n \rfloor,$$

где $2^{\lfloor k \rfloor + 1} + 6 \lfloor k \rfloor$ – сложность одного k -дерева $\lfloor \dots \rfloor$ -округление в нижнюю сторону (floor); таких деревьев (k -LUT) необходимо в первом слое $2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor k \rfloor}$, затем нужно провести декомпозицию k -LUT этого первого слоя, получаем $2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor k \rfloor - \lfloor k \rfloor}$. Всего необходимо i k -LUT, где i определяется из соотношения $\lfloor i \rfloor = \left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor$ всего

$$\sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor} 2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor i \rfloor \cdot \lfloor k \rfloor} \text{ и последний LUT на } \lfloor n \rfloor - \left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor \cdot \lfloor k \rfloor \text{ переменных.}$$

Временная задержка в количестве транзисторов определяется выражением

$$(3) \quad T_{n,k} = n + 2 \left\lceil \frac{n}{k} \right\rceil + 2 \cdot \left[\left\lceil \frac{n}{k} \right\rceil - \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor \right].$$

3. Оценка сложности логических элементов LUT-ST

Для использования в ССС предложен LUT-ST [3]. В этом случае сложность LUT возрастает:

$$(4) \quad L_{n,k.ST} = 2 \cdot \{2^{\lfloor n \rfloor} \cdot 8 + (2^{\lfloor k \rfloor + 1} + 6 \lfloor k \rfloor) \cdot \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{n}{k} \rfloor} 2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor i \rfloor \lfloor k \rfloor} +$$

$$+ \left(2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor \frac{n}{k} \rfloor \lfloor k \rfloor + 1} + 6 \cdot \left(\lfloor n \rfloor - \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor \cdot \lfloor k \rfloor \right) \right) + 6 \lfloor n \rfloor + 2 \cdot \lfloor n \rfloor \} +$$

$$+ 2 \cdot \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{n}{k} \rfloor} 2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor i \rfloor \lfloor k \rfloor} + 2 \cdot \left[\left\lceil \frac{n}{k} \right\rceil - \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor \right],$$

где $2 \cdot \lfloor n \rfloor$ – сложность дополнительных цепочек спейсера;

$2 \cdot \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{n}{k} \rfloor} 2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor i \rfloor \lfloor k \rfloor}$ – сложность индикаторов k -LUT + индикатор

последнего LUT $2 \cdot \left[\left\lceil \frac{n}{k} \right\rceil - \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor \right]$.

Выражение (4) не учитывает затраты на фиксацию переходного процесса Γ -триггерами [3]. Учесть двухвходовые Γ -триггеры сложностью 12 транзисторов можно, положив $k = 2$, а n :

$$(5) \quad n = \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{n}{k} \rfloor} 2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor i \rfloor \lfloor k \rfloor} + \left\lceil \frac{n}{k} \right\rceil - \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor.$$

Таким образом, получаем сложность Γ -триггеров:

$$(6) \quad 2 \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{n}{k} \rfloor} \left[2^{2^{[n-i][k]} + \lfloor \frac{n}{k} \rfloor} - \lfloor \frac{n}{k} \rfloor \right] \right\} + \left[\frac{n}{k} \right] - \left[\frac{n}{k} \right] \cdot 2^{\lfloor \frac{n}{k} \rfloor} + \left[\frac{n}{k} \right] - \left[\frac{n}{k} \right]$$

Временная задержка LUT-ST в количестве транзисторов (без учёта задержки Γ -триггеров) увеличивается на задержку индикаторов:

$$(7) \quad T_{n,k,ST} = n + 2 \left[\frac{n}{k} \right] + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{n}{k} \rfloor} 2^{2^{[n-i][k]} + \lfloor \frac{n}{k} \rfloor} + 2 \cdot \left[\frac{n}{k} \right] - \left[\frac{n}{k} \right]$$

Временная задержка LUT-ST в количестве транзисторов (без учёта задержки Γ -триггеров) увеличивается на задержку индикаторов:

$$(8) \quad T_{n,k,ST} = n + 2 \left[\frac{n}{k} \right] + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{n}{k} \rfloor} 2^{2^{[n-i][k]} + \lfloor \frac{n}{k} \rfloor} + 2 \cdot \left[\frac{n}{k} \right] - \left[\frac{n}{k} \right]$$

4. Оценка сложности логических элементов DC-LUT-ST, ДНФ-LUT-ST

Для реализации систем функций в СДНФ предложен DC-LUT [4]. Для ССС с учётом сложности m блоков реализации функций с соответствующей настройкой получаем сложность DC-LUT-ST:

$$\begin{aligned}
 L^m_{dc.n.k.ST} &= 2 \cdot \{2^{\lfloor n \rfloor} \cdot 8 + (2^{\lfloor k \rfloor + 1} + 6 \lfloor k \rfloor) \cdot \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \rfloor} 2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor i \rfloor \lfloor k \rfloor} + \\
 (9) \quad &+ \left(2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \rfloor \lfloor k \rfloor + 1} + 6 \cdot \left(\lfloor n \rfloor - \left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor \cdot \lfloor k \rfloor \right) \right) + 6 \lfloor n \rfloor + 2 \cdot \lfloor n \rfloor \} + \\
 &+ 2 \cdot \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \rfloor} 2^{\lfloor n \rfloor - \lfloor i \rfloor \lfloor k \rfloor} + 2 \cdot \left[\left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\lfloor n \rfloor}{\lfloor k \rfloor} \right\rfloor + \sum_{j=1}^{\lfloor n \rfloor} 2^j + 6m(2^n + 2) \right],
 \end{aligned}$$

где $6m(2^n + 2)$ – сложности m блоков реализации функций.

Для реализации систем функций в ДНФ предложен ДНФ-LUT [5]. При использовании ДНФ-LUT получаем сложность в количестве транзисторов:

$$(10) \quad L_{dnf} = \lfloor k \rfloor \cdot (20 \lfloor n \rfloor + 2 \cdot \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil) + 6 \cdot \lfloor m \rfloor (\lfloor k \rfloor + 2) + 6 \lfloor n \rfloor,$$

где $\lfloor k \rfloor \cdot (20 \lfloor n \rfloor + 2 \cdot \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil)$ учитывает сложность реализации k на-

страиваемых конъюнкций; $2 \cdot \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil$ – учитывает сложность ин-

верторов в блоке конъюнкций, в том числе для удовлетворения

ограничения Мида–Конвей [7] в блоках конъюнкций;

$6 \cdot \lfloor m \rfloor (\lfloor k \rfloor + 2)$ – сложность m блоков функций от k конъюнк-

ций (реализация монтажного И); $6 \lfloor n \rfloor$ – сложность инверторов

по n переменным (два на неинверсный вход, один на инверс-

$$(11) \quad L_{dnf-ST} = 2 \cdot \{ \lfloor k \rfloor \cdot (20 \lfloor n \rfloor + 2 \cdot \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil) + 6 \cdot \lfloor m \rfloor (\lfloor k \rfloor + 2) + 4 \lfloor n \rfloor \},$$

где $4 \lfloor n \rfloor$ учитывает инверторы по n парафазным переменным

(один на каждый вход, $2 \lfloor n \rfloor$) и цепочку спейсера – один тран-

зистор на каждый парафазный вход, всего $2 \lfloor n \rfloor$.

Сравнение выражений сложности предлагаемых технических решений изображено на рис. 1.

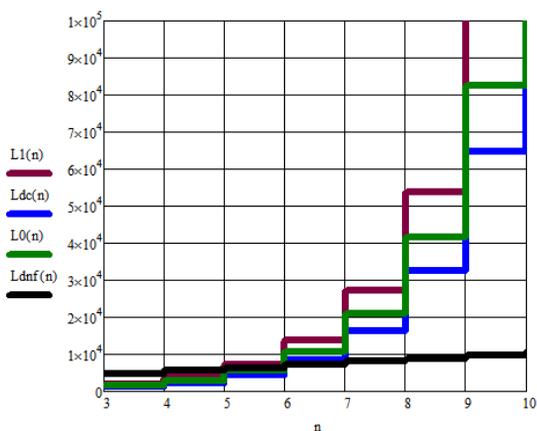


Рис. 1. Сравнение $L0(n)$, $L1(n)$, $Ldc(n)$, $Ldnf(n)$ при $m=8$; $k=3$; $r=20$

Таким образом, ДНФ-LUT-ST выигрывает по сложности реализации при большом количестве переменных системы логических функций. При среднем количестве переменных целесообразно использование DC-LUT-ST.

5. Оптимизация с использованием венгерского метода

Предлагается использовать известный венгерский метод оптимизации (Hungarian algorithm, Hungarian method) [2, 1] итеративно – для получения нескольких назначений по параметрам логических элементов и систем логических функций так, чтобы из частичных решений в дальнейшем построить глобальную таблицу назначений и получить глобальные назначения, которые и описывают требуемый результат выбора. Модификация метода предполагает вначале получение оценок по выражениям сложности (10), (9), (8), (4), (3), (2) и/или времени (3), (7) для заданных параметров системы функций. Для учёта возможности

покрытия одним типом устройства нескольких систем возможно использовать повторение строки матрицы. Предлагаемый алгоритм выбора конфигурируемых логических элементов, реализующих системы функций с использованием венгерского метода, изображён на рис. 2. В качестве вариантов реализации систем логических функций можно рассмотреть: 1) LUT по числу требуемых функций в системе; 2) DC LUT на заданное максимальное число функций; 3) ДНФ-LUT на заданное максимальное число конъюнкций и функций; 4) варианты комбинирования 1–3. Получим матрицу назначений W следующим образом: каждой строке соответствует вектор, отображающий количество каждой из формул, принимающих участие в расчёте. Так, вектору для первой строки (10,0,0,0) соответствует сумма из десяти формул 1, вектору для второй строки (0,10,0,0) – сумма десяти вторых формул, вектору для третьей строки (0,0,0,10) – сумма десяти третьих формул, вектору для четвёртой строки (3,3,4,0) – сумма

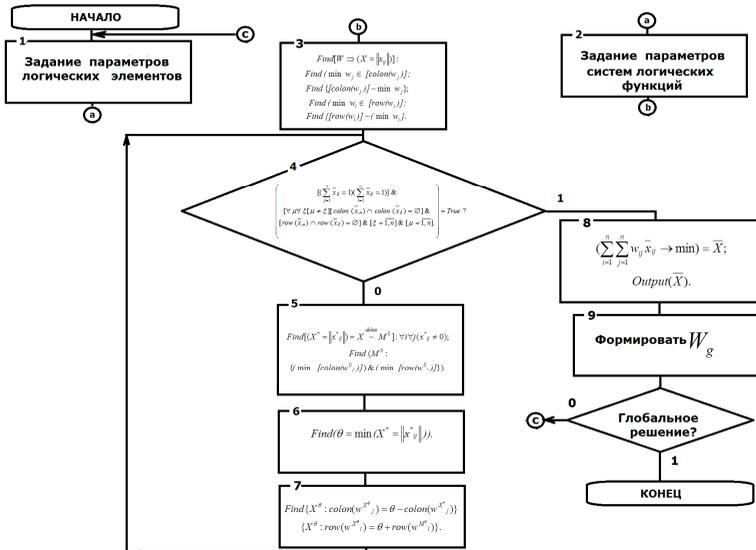


Рис. 2. Алгоритм выбора конфигурируемых логических элементов, реализующих системы функций с использованием венгерского метода

	$m = 6$ $k = 4$ $n = 2$	$m = 2$ $k = 3$ $n = 3$	$m = 4$ $k = 2$ $n = 5$	$m = 10$ $k = 1$ $n = 6$
(10,0,0,0)				
(0,10,0,0)				
(0,0,10,0)				
(3,3,4,0)				

Рис. 3. Пример результатов расчёта

трёх первых, трёх вторых и четырёх третьих формул. При этом каждому столбцу матрицы назначений W соответствует аргументы m , k и n . Пример результатов расчёта представлен на рис. 3.

6. Выводы

Расчёты показывают, что предлагаемый DC LUT FPGA предпочтительней по аппаратным затратам, чем известный LUT уже при количестве функций $m = 8$ для числа переменных $n = 4$. Предлагаемый логический элемент ПЛИС - ДНФ FPGA на основе ДНФ по сравнению с ЛЕ-СДНФ выигрывает при переходе к восьмизрядным функциям (для $n = k = m$). При этом существующий ЛЕ не может реализовать даже 32 разрядные функции, а предлагаемый имеет приемлемые затраты даже для 64-разрядных функций. Причём быстродействие предлагаемого варианта так же, как и известного, определяемого в основном длиной цепочки передающих транзисторов – n , определяется цепочкой транзисторов в блоках программируемых конъюнкций – это тоже n , а цепочки в блоках программируемых функций содержат всего один транзистор. В дальнейшем целесообразно использовать средние характеристики затрат на реализацию различных систем логических функций, полученных путём анализа типовых проектов, загружаемых в ПЛИС.

Литература

1. Библиотека элементов для проектирования самосинхронных полустаказных микросхем серий 5503/5507 и 5508/5509 / Ю.А. СТЕПЧЕНКОВ, А.Н. ДЕНИСОВ, Ю.Г. ДЬЯЧЕНКО, Ф.И. ГРИНФЕЛЬД, О.П. ФИЛИМОНЕНКО, Н.В. МОРОЗОВ, Д.Ю. СТЕПЧЕНКО; ИПИ РАН. – М., 2014. – С. 150–151.
2. ЗОЛОТУХА Р., КОМОЛОВ Д. *Stratix III – новое семейство FPGA фирмы Altera* [Электронный ресурс]. – URL: http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2006_12_30.pdf (дата обращения: 14.03.2017).
3. Пат. Рос. Федерация № 2601145. *Программируемое логическое устройство* / Тюрин С.Ф., Каменских А.Н., Плотникова А.Ю.; опубл. 27.10.2016, Бюл. № 30.
4. Пат. Рос. Федерация № 2573732. *Программируемое логическое устройство* / Тюрин С.Ф., Вихорев Р.В.; опубл. 27.01.2016, Бюл. № 3.
5. Пат. Рос. Федерация № 2544750. *Программируемое логическое устройство* / Тюрин С.Ф.; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8.
6. СТРОГАНОВ А., ЦЫБИН С. *Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри* [Электронный ресурс]. – URL: http://www.kite.ru/articles/plis/2010_11_56.php (дата обращения: 13.03.17).
7. УЛЬМАН ДЖ.Д. *Вычислительные аспекты СБИС*: пер. с англ. А.В. Неймана / под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Радио и связь, 1990. – 480 с.
8. Harold W. Kuhn. *The Hungarian Method for the assignment problem*, Naval Research Logistics Quarterly, 2: 83–97, 1955; DOI: 10.1002/nav.3800020109

OPTIMIZATION OF LUT FPGA BASED ON MODIFIED HUNGARIAN METHOD

Alexey Nikitin, Perm National Research Polytechnic University, student (siriousbiz@ya.ru).

Ruslan Vikhorev, Perm National Research Polytechnic University, post-graduate (vihrusvla@mail.ru).

Alexandra Plotnikova, Perm National Research Polytechnic University, post-graduate (juris-plot@mail.ru).

Abstract: In this article estimated complexity of the configurable logic elements that implement system functions. Analyzes and compares the variants of realization of the elements. To select the optimal set of items for the various parameters of systems of boolean functions proposed modification of the Hungarian method.

Keywords: logic gates, logic functions, evaluation of complexity, optimization, Hungarian method.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОИСКА УЯЗВИМОСТЕЙ В МЕХАНИЗМАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОГРАНИЧЕННОГО РЕСУРСА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СИСТЕМ

Харьковская И.С.¹, Елистратов А.А.²

*(Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева, Самара)*

В данной работе рассмотрена возможность применения нейронных сетей для поиска уязвимостей в механизмах распределения ограниченного ресурса.

Ключевые слова: деловая игра, распределение ресурсов, нейронная сеть.

1. Введение

Планируется разработать автоматизированную систему (АС) с использованием нейронной сети для определения слабых мест в механизмах распределения ограниченных ресурсов в деловых играх. В качестве примера представлена работа АС для поиска уязвимостей алгоритма Гровса–Лейдьярда, а также сформулирована методология проектирования и обучения нейронных сетей, предназначенных для анализа работы механизмов распределения ограниченных ресурсов, используемых в деловых играх.

АС обрабатывает результаты игр и осуществляет поиск выигрышных стратегий посредством поиска слабых мест механизмов распределения ресурсов. Для проведения экспериментов

¹ *Илона Сергеевна Харьковская, студентка (lonkaX@yandex.ru).*

² *Александр Алексеевич Елистратов, студент (alexsanr56@gmail.com).*

разработана деловая игра, предоставляющая возможность игры с несколькими участниками. При разработке игры планируется использовать фреймворк oTree.

Для обучения нейронных сетей используются два вида обучения – с учителем и без учителя. Алгоритмы обучения с учителем основаны на минимизации целевой функции, как правило, функции погрешности. Алгоритмы обучения без учителя состоят в кластеризации входных данных. Для данной работы был выбран алгоритм обучения без учителя.

2. Кластеризация

На данный момент проведена кластеризация проведенных игр по механизму распределения Гровса–Лейдярда с использованием алгоритма *k*-средних.

Для исследования произведено преобразование данных игр следующим образом. Результаты игр представлены в виде векторов (прибыль, штраф, раздача, заявка1, заявка2, заявка3). Для получения данных, пригодных для кластеризации, взята производная от массива векторов.

Полученные данные разбиты на 6 кластеров, центры которых позволяют узнать как наиболее выигрышные стратегии, так и проигрышные.

3. Результаты кластеризации

Результатами кластеризации является массив из 6 центров кластеров, в котором выделяются следующие типы поведения игроков и их следствия (таблица).

Среди результатов выделяются три центра (типа поведения игроков), которые дают увеличение прибыли. Большинство игроков вели себя пассивно (кластер 1) – изменяли заявки на каждом ходе слабо, что давало им стабильный прирост прибыли, а также убыль штрафа. Однако, как можно увидеть по результатам таблицы, наибольшую прибыль дают кластеры 3 и 5. Остальные кластеры показывают поведение игроков, которые совершали убыточные ходы.

Результаты кластеризации данных

№ п/п	Прибыль	Штраф	Раздача	Заявка 1	Заявка 2	Заявка 3	Размер кластера	Общее изменение раздачи
1	0,16	-0,17	-0,24	-0,45	-0,25	0,65	1482	1,35
2	-9992,92	-11,7	-64,12	-1,81	-7,89	3,52	21	13,21
3	10005,02	0,33	87,28	-20,49	31,58	-5,79	20	57,86
4	-11140,15	11141,8	35,09	10,66	35,95	-75,74	27	122,34
5	10019,94	-10667	-69,01	-9,99	-51,54	86,46	31	147,99
6	-107,31	10122	368,67	363,72	163,4	-527,1	3	1054,2

4. Заключение

В результате работы были получены сгруппированные данные, которые будут использованы в дальнейшем для обучения нейронной сети.

Литература

1. ДОДОНОВА Н.Л., КУЗНЕЦОВА О.А. *Моделирование процесса распределения ограниченного ресурса в условиях неполной информированности* // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017): сб. тр. III Междунар. конф. и молодежной школы. – Самара: Новая техника, 2017. – С. 1299–1302
2. ЕГОРОВ А.В., КУПРИЯНОВА Н.И. *Особенности методов кластеризации данных* // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 11. – С. 174–178
3. КОРГИН Н.А., КОРЕПАНОВ В.О. *Решение задачи эффективного распределения ресурсов на основе механизма Гровса–Лейдряда при трансформальной полезности* // Управление большими системами: сб. тр. – 2013. – № 46. – С. 216–266.
4. СОЛДАТОВА О.П., ЧАЙКА П.Д. *Исследование эффективности решения задачи классификации гибридными сетями Кохонена* // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2015. – Т. 17, № 2 (5). – С. 1147–1152

**AUTOMATED VULNERABILITY SEARCH SYSTEM
IN DISTRIBUTION SYSTEMS OF RESTRICTED
RESOURCES BASED ON NEURAL SYSTEMS**

Ilonka Kharkovskaya, student (IlonkaX@yandex.ru).

Alexander Elistratov, student (alexsanr56@gmail.com).

Abstract: Possibility of neural networks usage for searching vulnerabilities of resource allocation mechanisms will be examined in this paper.

Keywords: business game, resource allocation, neural network.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

Истомин Д.А.¹

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Рассматривается современное промышленное предприятие, осуществляющее инновационную деятельность в рамках основного производства. Предлагается имитационная модель для анализа оптимальности применимости инновационной деятельности, а также устойчивости развития данного предприятия во времени. Рассматривается вариант построения информационной системы, позволяющей осуществлять данное моделирование. Рассматриваются модули оптимизации и анализа устойчивости.

Ключевые слова: промышленное предприятие, инновационная деятельность, имитационное моделирование, управление.

1. Введение

В рамках рыночной конкуренции и изменчивости потребностей рынка у производственных предприятий имеется постоянная необходимость в разработке и внедрении инноваций, которые бы позволили менять характеристики выпускаемой продукции, а также выпускать новую продукцию. Предлагается рассматривать предприятие в качестве совокупности двух контуров: производство продукции и производство и внедрение инноваций (рис. 1). Характер изменения финансовых результа-

¹ Денис Андреевич Истомин, аспирант (dai@pstu.ru).

тов предприятия носит нелинейный характер во времени, поэтому предлагается применить имитационный подход.

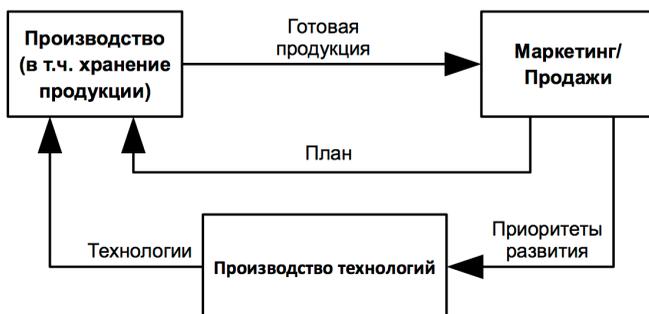


Рис. 1. Концептуальная схема предприятия

Целью данной работы является построение имитационной модели и реализация прототипа информационной системы, позволяющей производить анализ производственной и инновационной деятельности, а также устойчивости развития предприятия во времени.

2. Анализ существующих подходов к моделированию промышленных предприятий

Важно отметить не только имитационный подход применительно к моделированию работы промышленного предприятия [2], но и основные методы экономического моделирования [5], а также использование аппарата дифференциальных уравнений при исследовании предприятия в качестве динамической системы [1].

Для имитационного моделирования технологических процессов часто используется инструмент Anylogic [6] и др. В рамках решаемой задачи будет рассматриваться создание новой упрощенной системы, позволяющей произвести моделирование. Создание такой системы с использованием новых технологий позволит проще встраивать разработанное решение в существующие системы, используемые на предприятии.

3. Описание имитационной модели и информационной системы

В качестве реализации сформулированной задачи была создана имитационная система с дискретным временем, позволяющая провести динамический анализ предприятия.

Основные компоненты информационной системы, реализующей имитационное моделирование:

- 1) классы, позволяющие описать модель: вершины и связи между ними;
- 2) модули исполнения модели, логгирования и анализа;
- 3) хранилище данных. Хранение данных осуществляется в реляционной СУБД.

3.1. ОСНОВНЫЕ ВЕРШИНЫ

Моделируемое предприятие представляет собой совокупность вершин. Пример одной из них представлен на рис. 2. Каждая вершина (Node) содержит в себе универсальные точки подключения (Connection) и связи между ними (Link). Если переходить к реализации, то данные сущности могут быть реализованы в виде классов в объектно-ориентированной парадигме.

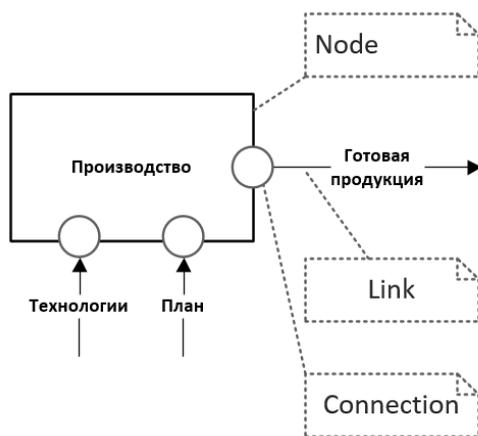


Рис. 2. Схематичное отображение классов Node, Link и Connection на примере производственного узла

Однотипность вершин позволяет реализовывать модель предприятия различной топологии и быть независимой от предметной области.

3.2. МОДУЛЬ РАНЖИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

Данный модуль необходим для адекватного описания каждого из инновационных проектов и проведения операции выбора совокупности инновационных проектов. Проекты для реализации должны выбираться с учетом приоритетов развития предприятия, а также с учетом ограничений на производственные ресурсы.

В данном модуле возможно применение аппарата нечетких множеств [4], где каждый инновационный проект – нечеткое множество, к которым применим индекс ранжирования [1]. Каждый проект может представлять собой совокупность экспертных оценок, описывающих проект в целом.



Рис. 3. Концептуальная схема модуля ранжирования

3.3 МОДУЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ И АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ

Модуль оптимизации и анализа устойчивости (рис. 4) необходим для того, чтобы:

- 1) определить оптимальные приоритеты развития предприятия. Данные приоритеты учитываются в модуле ранжирования;
- 2) определить, насколько устойчиво будет развиваться предприятие с учетом выбранного объема финансирования, приоритетов развития в зависимости от колебаний конъюнктуры рынка.

Для поиска оптимальных приоритетов развития (параметров управления) возможно применение методов безусловной линейной оптимизации с методом штрафных функций.



Рис. 4. Концептуальная схема модуля оптимизации и анализа устойчивости

Для анализа устойчивости в самом простом варианте можно входные параметры изменять с некоторой функцией распределения и анализировать изменение финансовых показателей моделируемого предприятия.

4. Выводы

Предложенная имитационная модель позволяет осуществлять анализ производственной и инновационной деятельности, а также производить анализ устойчивости развития предприятия во времени.

Ввиду того что в модуле ранжирования используется экспертное оценивание каждого из инновационных проектов, возможно развитие системы в сторону интеллектуализации формирования оценки, а также в область кооперативного принятия решений [3] для формирования более точной оценки.

Литература

1. ДОМОШНИЦКИЙ А.И., ИСТОМИН Д.А., ГИТМАН М.Б. *Разработка модели развития инновационного предприятия как динамической системы с эффектом памяти // Прикладная математика и вопросы управления.* – 2015. – № 1, С. 49–59.
2. ИСТОМИН Д.А., ГИТМАН М.Б. *Имитационная модель управления стратегическим развитием промышленного*

- предприятия* // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та им. М.Т. Калашникова. – 2017. – Т. 20, № 2.
3. МУЛЕН Э. *Кооперативное принятие решений: аксиомы и модели*. – М.: Мир, 1991. – 464 с.
 4. ПЕРЕГУДОВ Ф.И., ТАРАСЕНКО Ф.П. *Введение в системный анализ*. – М.: Высш. шк., 1989. – 360 с.
 5. СИМОНОВ П.М. *Экономико-математическое моделирование: учеб. пособие: в 2 ч.* / Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2009. – Ч. 1. – 338 с.
 6. ХАЙМОВИЧ И.Н., СКРИПАЧЕВ Д.Г., КОЛЕСНИКОВА С.Ю. *Имитационное моделирование производственного цикла изготовления провода* // Машиностроение и энергетика. – 2015. – Т. 14, № 4. – С. 151–155.

PRODUCTION MANAGEMENT BASED ON SIMULATION OF LOGISTICS FLOWS

Denis Istomin, Perm National Research Polytechnic University, post-graduate (dai@pstu.ru).

Abstract: A modern manufacturing enterprise that carries out innovative activities simultaneously with the implementation of the main production is considered. A simulation model for analyzing the optimality of innovation activity applicability, as well as analyzing the sustainability of the development of a given enterprise in time is proposed. The information system that allows to carry out the given modeling is considered. Modules of optimization and stability analysis are considered.

Keywords: manufacturing enterprise, innovation activities, simulation modeling, management.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УЧЁТА АКЦИЗОВ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

Карамзина А. Г.¹, Маликова Н.Ш.²

*(Уфимский государственный авиационный
технический университет, Уфа)*

Работа посвящена проблеме создания автоматизированной информационной системы учета акцизов на крупном нефтеперерабатывающем предприятии.

Рассмотрены вопросы проектирования системы составления налоговой декларации по акцизам на нефтепродукты, а также составления реестра подтверждающих документов по экспорту, которые в обязательном порядке представляются предприятием каждый отчетный период.

Сформулирована задача проектирования, выполнен анализ существующих технических решений, предложена структура и алгоритмы функционирования оригинальной информационной системы, разработан проект, включающий функциональные модели предлагаемого процесса с использованием объектно-ориентированной методологии.

Ключевые слова: SAP ERP, 1С, база данных, акцизы, автоматизация ИС.

1. Введение

В современных экономических условиях перед предприятиями и организациями стоят задачи максимального сокраще-

¹ Анастасия Геннадьевна Карамзина, кандидат технических наук, доцент (karamzina@tc.ugatu.ac.ru).

² Нафиса Шамилевна Маликова, студентка (malikova.n.sh@gmail.com).

ния времени реагирования на запросы заказчика, ускорения принятия решений по управлению производством и как следствие совершенствования форм автоматизированного учета и планирования, а также налогообложения. Без автоматизации систем управления и налогообложения невозможно представить себе современное предприятие.

Проблемы, связанные с расчетом различных налогов и оформлением документации по ним, с каждым годом становятся все более актуальными.

Акциз – налог, взимаемый с юридических лиц при реализации определенной номенклатурной группы товаров, в том числе при их перемещении через таможенную границу Российской Федерации.

Механизм исчисления и уплаты акциза предполагает определение суммы налога при совершении операций с подакцизной продукцией и включение сумм налога в цену товара. Это означает, что каждый экономический субъект, участвующий в обороте подакцизных товаров, осуществляет расчет суммы акциза, подлежащей уплате в бюджет, и при реализации передает данную обязанность следующему контрагенту вплоть до конечного потребителя, который и несет бремя акцизного налогообложения. Таким образом, налог регулирует потребление подакцизной продукции.

Процесс учета акцизов ООО «Соровскнефть» осуществляется в системе 1С: Предприятие. Данная система не является системой, отвечающей международным требованиям, обладает низкой производительностью, а кроме того, рассматриваемый процесс нуждается в дополнительном контроле со стороны разных отделов предприятия. Это требует внимательности сотрудников, концентрации, однообразной напряженной работы, что ведет к появлению ошибок из-за человеческого фактора, а также к значительным временным затратам.

Целью данной работы является перенос процесса формирования декларации по акцизам и реестра подтверждающих документов по экспорту в компании ООО «Соровскнефть» с системы 1С: Предприятие в систему управления SAPERP, которая позволит облегчить и ускорить данный процесс.

2. Актуальность

Разработка модулей информационных систем, поддерживающих налоговый учет в системе, представляет большой интерес в связи с тем, что налоговое законодательство меняется в нашей стране как минимум один-два раз в год. Международные системы учета предприятия включают в себя только те модули, которые являются типичными для большинства компаний в обслуживаемой стране.

Разработка информационной системы формирования учета акцизов представляется актуальной задачей для предприятий, которые имеют дело с подакцизными товарами (производство, покупка, продажа).

3. Проектная часть

3.1. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы из всего комплекса задач была рассмотрена задача учета акцизов на нефтеперерабатывающем предприятии. Для раскрытия экономической сущности рассматриваемого процесса необходимо провести полное обследование существующей методики формирования документов для сдачи в налоговые органы.

Первый шаг в данном процессе – это поступление финансовых данных из отдела закупок и реализации.

Бухгалтеры отдела бухгалтерского учета для учета акциза на предприятии должны совершить следующие действия:

- 1) просмотреть документы по реализации подакцизных товаров на территории РФ, созданные в модуле сбыт;
- 2) просмотреть документы по отгрузке подакцизных товаров на территории РФ, созданные в модуле сбыт;
- 3) начисление акциза по отгруженной подакцизной продукции на территории РФ;
- 4) просмотреть документы, закрывающие 76* (авансовые) счета;
- 5) просмотреть документ по передаче подакцизных товаров по ВХО в сбытовые подразделения;
- 6) создать документ принятия исчисленного акциза от сбытового подразделения;

7) создать документы начисления акциза при использовании подакцизного товара на собственные нужды;

8) затем главный бухгалтер отдела бухгалтерского учета проверяет данные и передает их в отдел налогового учета.

9) бухгалтер отдела налогового учета должен сделать следующее:

9.1) просмотреть документы начисления акциза при реализации прямогонного бензина, созданный в модуле сбыт;

9.2) создать документ возмещения акциза по прямогонному бензину.

Далее в налоговом отделе бухгалтеры формируют разделы документа «Декларация по акцизам на подакцизные товары». Главный бухгалтер проверяет и формирует цельный документ для передачи в налоговые органы. Также к декларации по акцизам прикладывается документ «Реестр подтверждающих документов по экспорту», который формируется как в отделе экспорта, так и в отделе налогов, где бухгалтеры каждого отдела в зависимости от вида операции: «Экспортные операции по банковской гарантии» или «Экспортные операции в страны таможенного союза» выполняют следующие действия:

1) просмотр документа отгрузки подакцизного товара на экспорт;

2) создание документа учета начисления акциза по отгрузке;

Следующие шаги выполняются только при операции «Экспортные операции в страны таможенного союза»:

1) создание документа уточнения отгруженного подакцизного товара;

2) начисление акциза по уточненной отгрузке;

3) создание документа при передаче подтверждающих документов в налоговый орган;

4) создание документа возмещения акциза по решению налогового органа;

5) создание документа по списанию начисленного акциза при непредставлении подтверждающих документов;

6) создание документа по подтверждению акциза налоговым органом;

7) создание документа по начислению акциза при непредставлении подтверждающих документов в течение 180 дней в налоговый орган;

8) создание документа при передаче подтверждающих документов в налоговый орган;

9) создание документа возмещения акциза по решению налогового органа;

10) создание документа по списанию начисленного акциза при непредставлении подтверждающих документов [1].

Далее бухгалтер отдела экспорта и бухгалтер отдела налогового учета формируют предварительные документы «Реестр подтверждающих документов по экспорту налогового отдела» и «Реестр подтверждающих документов по экспорту экспортного отдела» и передают главным бухгалтерам своего отдела.

Далее главный бухгалтер отдела экспорта и главный бухгалтер отдела налогового учета сверяют расчеты и формируют документ «Реестр подтверждающих документов по экспорту» для передачи в налоговые органы.

Весь процесс контролирует отдел внутреннего аудита, который по результатам каждой проверки составляет отчет о проделанной работе и выявленных ошибках. Отдел внутреннего аудита передает всю отчетность отделу аудита предприятия.

На основе проанализированных данных была составлена функциональная модель (рис. 1).

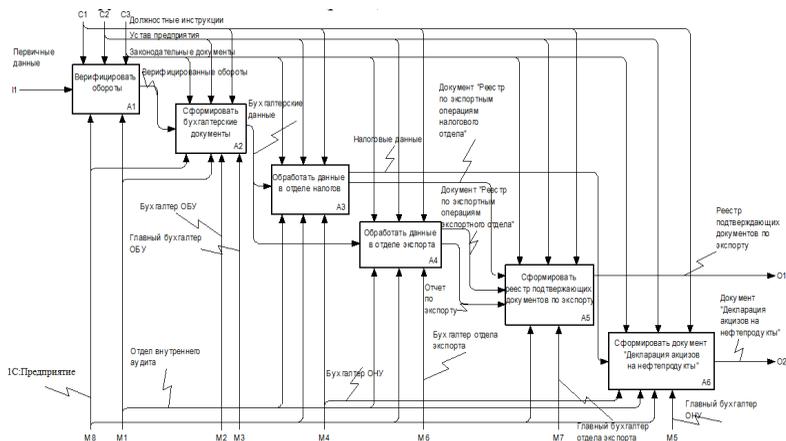


Рис. 1. Декомпозиция блока A0 «Учет акциза на предприятии»

Из представленной модели существующего процесса можно сделать вывод о наличии ряда проблем в организации процесса учета акцизов на предприятии:

- участие двух отделов контроля для проверки сформированных документов;
- необходимость формирования нескольких документов для формирования одного (реестр подтверждающих документов по экспорту).

Для устранения данных недостатков необходимо усовершенствовать процесс формирования налоговой отчетности.

Предметной областью является внедрение разработки учета акцизов на предприятии.

Существующий метод осуществлен в 1С: Предприятие.

Данная корпоративная система имеет ряд недостатков:

- недостаточная производительность системы;
- недостаточная функциональность системы;
- несоответствие международным требованиям.

На предприятии начали внедрять систему SAP ERP в 2016 году. Система имеет стандартные транзакции, но их не всегда достаточно для выполнения.

Таким образом, возникает необходимость дополнительных разработок системы.

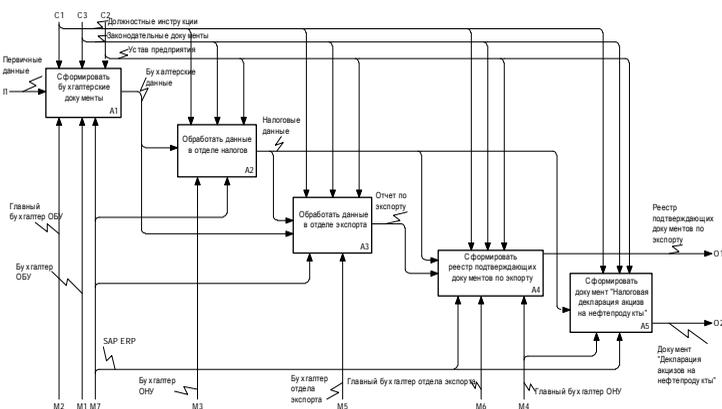


Рис. 2. Декомпозиция блока А0 «Учет акциза на предприятии» с учетом внедрения новой информационной системы

Изменение процесса позволит оптимизировать работу. Не требуется участия дополнительных контролирующих структур предприятия, так как система SAP ERP полностью соответствует международным стандартам, настроена соответствующим образом и обладает высокой производительностью.

Функциональная модель предлагаемого процесса с учетом внедрения новой информационной системы (рис. 2).

3.2 ПОСТРОЕНИЕ КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ

Система управления предлагаемой системы в качестве объекта управления использует входящую документацию. Система имеет следующие контуры:

- контур регулирования;
- контур адаптации.

Контур управления представлен на рис. 3. В качестве объекта управления выступает процесс расчета акциза, который использует первичные данные для расчета: налоговая база и ставка акциза, который испытывает возмущающие воздействия. После расчета акциза происходит анализ полученных значений. При

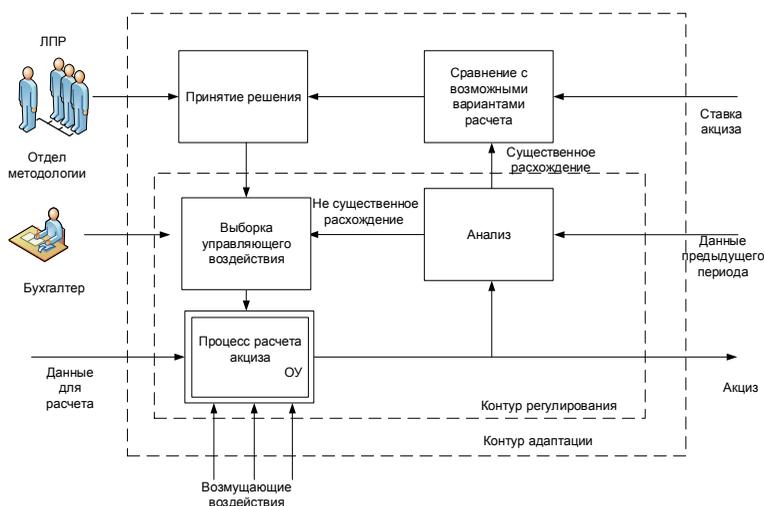


Рис. 3. Контур управления

получении результатов, не удовлетворяющих интересам предприятия, происходит перерасчет и сравнение полученных значений результатов с предполагаемыми. Далее ЛПР в лице отдела методологии принимает решение, стоит ли принимать новый вариант расчета. После этого происходит реализация управляющего воздействия – либо внесение изменений в объект управления для достижения поставленной цели, либо невнесение изменений.

4. Заключение

В ходе обследования существующего процесса было выявлено, что процесс является трудоемким вследствие участия двух отделов контроля для проверки сформированных документов, необходимости формирования нескольких документов для формирования одного и необходимости расчета налоговой базы. Также были выявлены недостатки функционирующей на предприятии ООО «Соровскнефть» системы 1С: Предприятие, такие как недостаточная производительность системы, недостаточная функциональность системы, необходимость управления процессом изменения системы и несоответствие международным требованиям.

Переход на систему SAP позволило решить существующие проблемы, при этом сократилось время, затрачиваемое сотрудниками на обработку документов, повысилась эффективность их работы, а следовательно, и предприятия в целом.

INFORMATION SYSTEM OF ACCOUNTING ACCOUNTS AT OIL REFINING ENTERPRISES

Anastasia Karamzina, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Cand.Sc., assistant professor (karamzina@tc.ugatu.ac.ru).

Nafisa Malikova, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, student (malikova.n.sh@gmail.com).

Abstract: The work is devoted to the problem of creating an automated information system for accounting excises at a large oil refinery.

Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами

The issues of designing a system for drawing up a tax declaration for excises on oil products, as well as drawing up a register of confirming export documents, which are mandatory provided by the enterprise every reporting period, are considered.

The design problem is formulated, the analysis of existing technical solutions is made, the structure and algorithms of functioning of the original information system are proposed, a project is developed that includes the functional models of the proposed process using object-oriented methodology.

Keywords: SAP ERP, 1C, data bases, excises, automation of information systems.

УДК 621.391
ББК 32.972.5

УПРАВЛЕНИЕ СВЯЗНОСТЬЮ БЕСПРОВОДНОЙ МЭШ-СЕТИ

Заборских К.Д.¹, Гаврилов А.В.²

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

В данной статье рассматривается алгоритм оптимизации связности беспроводной мэш-сети по критерию уровень сигнала. Целью оптимизации является снижение задержек в сети при передаче данных.

Ключевые слова: беспроводная мэш-сеть, связность, задержка, оптимизация.

1. Введение

Одними из наиболее перспективных и популярных направлений в инфокоммуникационных технологиях на сегодняшний день являются «Интернет вещей» и беспроводные сенсорные сети. Особенностью при реализации проектов этих направлений является использование дешевых аппаратных сетевых узлов с применением топологии мэш-сети. Сеть на базе топологии мэш обладает массой достоинств, таких как высокая масштабируемость, надежность, отказоустойчивость, что позволяет строить самоорганизующиеся сети с большим радиусом покрытия [1].

Аппаратное обеспечение узлов мэш-сети обычно представляет собой микроконтроллер с встроенным приемопередатчиком и с поддержкой одной из технологий радиопередачи. Одним из таких микроконтроллеров является модуль ESP8266 фирмы Espressif [3]. Модуль использует для передачи технологию WiFi диапазон 2,4 ГГц. Его популярность обусловлена низ-

¹ Кирилл Дмитриевич Заборских, студент, (zbdk@bk.ru).

² Алексей Викторович Гаврилов, старший преподаватель (gaval@at.pstu.ru).

кой стоимостью, а также широкими функциональными возможностями (поддержка интерфейсов SPI, UART и GPIO), что позволяет подключать к нему дополнительные устройства. Однако изначально модуль разрабатывался как обычный узел в сети WiFi с реализацией режима точки доступа или клиента. Позже компания Espressif разработала программное обеспечение (прошивку) для создания мэш-сети [4]. Прошивка задумывалась как расширение емкостных возможностей маршрутизатора, так как напрямую к нему можно подключить лишь ограниченное число устройств. Прошивка подразумевает создание мэш-сети из устройств, требующих подключения. В ней выделяется одно корневое устройство, через которое мэш-сеть подключается к маршрутизатору. Структура такой сети изображена на рис. 1.

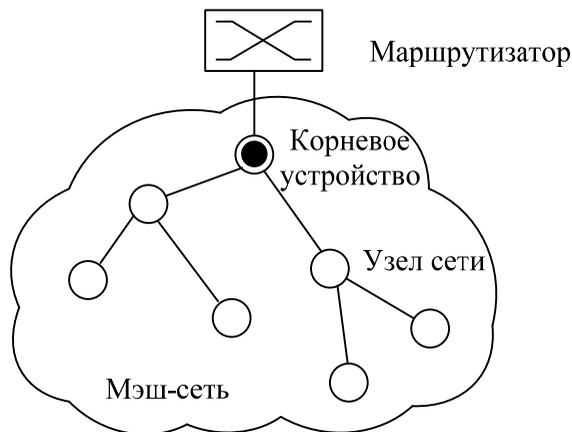


Рис. 1. Структура сети согласно прошивке от Espressif

Однако у этой прошивки есть один большой минус: все библиотеки с алгоритмами функционирования являются закрытыми и предлагается использовать прошивку «как есть», то есть исследовать и модернизировать прошивку возможности нет.

В связи с высокой популярностью модулей ESP8266 энтузиасты начали разработку альтернативной прошивки с открытым кодом PainlessMesh [2]. Прошивка PainlessMesh для переда-

чи сообщений между модулями использует протокол JSON. Несомненным преимуществом прошивки PainlessMesh относительно прошивки мэш-сети от компании Espressif является то, что она имеет открытый код, а также то, что в ней уже реализованы механизмы синхронизации часов реального времени всех модулей в составе сети, что позволяет синхронизировать все события. Авторами было принято решение об использовании этой прошивки для практического исследования характеристик мэш-сетей.

2. Исследование сети с использованием сторонней прошивки

В прошивке PainlessMesh заявлена поддержка самоорганизации сети. Анализ исходного кода и экспериментальные проверки позволили определить процедуру создания структуры сети: после запуска модулей каждый из них становится станцией и точкой доступа. Каждая станция, которая еще не подключена к точке доступа в рамках этой сети, периодически сканирует пространство на наличие точки доступа. Она будет пытаться подключиться к точке доступа с самым сильным уровнем сигнала, если до нее еще не существует прямого или посреднического соединения. То есть подключение возможно только к «свободной» точке с максимальным уровнем сигнала. При этом будут пропущены точки с еще большим уровнем сигнала, если они заняты. После подключения к точке доступа станция перестает сканировать окружение до тех пор, пока не будет потеряно соединение с текущей точкой доступа. Структура сети, образованной при помощи этой прошивки, изображена на рис. 2. Таким образом, формируемая структура сети не всегда будет оптимальной с точки зрения связности между узлами. Установленные связи между узлами не будут минимизированы по расстоянию и, соответственно, по уровню сигнала.

Так как сеть в конечном итоге имеет не всегда оптимальную структуру соединений и за счет чего увеличивается задержка прохождения пакета от источника до адресата, то необходимо изменить алгоритм формирования структуры сети. Необходимо,

чтобы станция периодически сканировала пространство на наличие точки доступа с более высоким уровнем сигнала, нежели соединение с текущей точкой доступа; в случае обнаружения точки доступа с более высоким уровнем сигнала, станция должна разрывать соединение с текущей точкой доступа и установить новое оптимальное соединение с найденной точкой доступа; предполагается за счет такой оптимизации сети уменьшить задержки при прохождении пакета по сети.

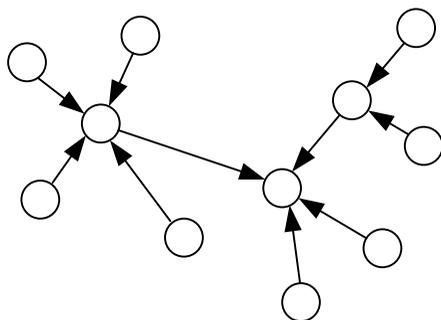


Рис. 2. Структура сети согласно прошивке om PaintlessMesh

3. Модернизация алгоритма формирования структуры сети

Был разработан дополнительный алгоритм сканирования окружения, который запускается после того, как станция присоединится к точке доступа.

Алгоритм имеет следующую структуру:

1. Запуск дополнительного сканирования и проверка, подключена ли станция к точке доступа; если станция еще не подключена, то повторяем проверку через 5 секунд; если подключена, то переходим к пункту 2.

2. Запуск сканирования в рамках сети с заданным SSID; сканирование подразумевает запись всех обнаруженных точек доступа и уровень сигнала к ним.

3. После того как составлен список из точек доступа и уровней сигнала к ним, начинаем перебор каждого варианта из списка; проверяем: если мы напрямую уже подключены к данной точке доступа либо данный модуль напрямую подключен к нам (то есть он выступает в качестве станции, а мы в качестве точки доступа), то удаляем его из списка.

4. После перебора в списке остаются только те точки доступа, к которым текущий не имеет прямого подключения; перебираем каждый вариант из вновь получившегося списка и ищем тот, уровень сигнала которого хотя бы на 10 dBm лучше уровня сигнала до текущей точки доступа; если список пуст, то возвращаемся к пункту 1.

5. При нахождении такого варианта необходимо разорвать подключение к текущей точке доступа и предпринять попытку подключения к найденному варианту; в случае ненахождения такого варианта возвращаемся к пункту 1.

Были проведены эксперименты на сети, состоящей из пяти модулей, с использованием исходной и модифицированной прошивок. Структуры сетей изображены на рис. 3.

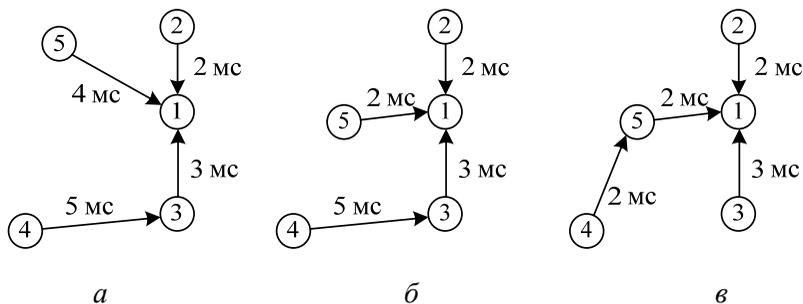


Рис. 3. Структура сети согласно прошивке от PaintlessMesh

На рис. 3, а изображена сеть, полученная при использовании исходной прошивки. Модули 1, 2, 3 были включены одновременно первыми; модуль 4 включен вторым и модуль 5 последним; пакет передается от модуля 4 к модулю 5, задержка прохождения составляет 12 мс.

На рис. 3, б изображена ситуация, когда модуль 5 был перемещен, задержка уменьшилась, но нетрудно заметить, что структура подключений на данный момент не оптимальна, в этом и состоит решаемая проблема. Итоговая задержка при прохождении от модуля 4 к модулю 5 теперь составляет 10 мс.

На рис. 3, в изображена сеть, полученная с использованием модифицированной прошивки из ситуации, изображенной на рис. 3, б. Видно, что произошло переключение соединений, то есть модуль 4 подключился на 5, и теперь задержка при передаче от модуля 4 к модулю 5 составляет всего 2 мс.

Модернизация прошивки позволила оптимизировать связность узлов сети по критерию *уровень сигнала*, что позволило уменьшить задержку прохождения пакета по сети. В дальнейшем авторы планируют реализовать многокритериальную оптимизацию связности сети: по степени загруженности узла и по уровню заряда батареи, питающей модуль.

Литература

1. БЕЗУКЛАДНИКОВ И.И., ГАВРИЛОВ А.В. *Управление и мониторинг в беспроводных распределенных сетевых инфраструктурах* // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2016. – № 8. – С. 18–23.
2. *BlackEdder / painlessMesh*: портал – URL: <https://gitlab.com/BlackEdder/painlessMesh> свободный. – Загл. с экрана (accessed at 25 July 2017).
3. *ESP8266 WROOM-02 Overview*: портал – URL: <https://espressif.com/en/products/hardware/esp-wroom-02/overview>, свободный. – Загл. с экрана (accessed at 25 July 2017).
4. *ESP8266_MESH_DEMO*: портал – URL: https://github.com/espressif/ESP8266_MESH_DEMO, свободный. – Загл. с экрана (accessed at 25 July 2017).

MANAGEMENT OF CONNECTIVITY IN WIRELESS MESH NETWORK

Kirill Zaborskih, Perm National Research Polytechnic University, Perm, student (zbkd@bk.ru).

Aleksei Gavrilov, Perm National Research Polytechnic University, Perm, senior lecturer (gaval@at.pstu.ru).

Abstract: This article explores the creation of links between the nodes of a wireless mesh network. The hardware of the network nodes is implemented on the modules of ESP8266 by Espressif Systems. The software of the nodes is based on the PaintlessMesh firmware. Investigations of the procedure for establishing links between nodes have been performed. The issues of network connectivity management are considered. An algorithm for establishing connections between nodes is proposed. Connectivity optimization is performed by the criterion signal level. The goal of optimization is to reduce network delays in transferring data between nodes. The results obtained show a decrease in network delays when using the proposed algorithm.

Keywords: wireless mesh, connectivity, delay transmission, optimization.

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПОИСКЕ КОНТУРОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ФОРМАТА DICOM

Клестов Р. А.¹, Столбов В.Ю.²

*(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь)*

Рассматривается гибридный метод распознавания контуров, включающий несколько этапов обработки исходного изображения. Выделяются и описываются характерные особенности существующих методов распознавания контуров. Предлагается определенная последовательность применения методов. Особое внимание уделено методам, обеспечивающим работу со сложными входными данными, имеющими близкую к однородной структуру. Описывается математическая особенность работы каждого из методов. Приводятся примеры выходных данных при использовании различных методов обработки изображения. На основе практического использования каждой из представленных технологий компьютерного зрения делаются соответствующие выводы и рекомендации. Проведено сравнение качества распознавания контуров на изображениях в иллюстрациях.

Ключевые слова: распознавание контуров, компьютерное зрение, гибридный метод, цепной код Фримена, оператор Кэнни, фильтр Kuwahara.

¹ Роман Андреевич Клестов, магистр (klestovroman@gmail.com).

² Валерий Юрьевич Столбов, доктор технических наук, профессор (valeriy.stolbov@gmail.com).

1. Введение

Область компьютерного зрения является действительно инновационно привлекательной. Интерес к ней возник на заре создания искусственного интеллекта [3]. В настоящее время количество новых решений и актуальных приложений для компьютерного зрения продолжает расти. Это в полной мере относится к проблеме разработки информационных систем поддержки принятия решений в различных областях человеческой деятельности.

С увеличением количества предлагаемых способов и алгоритмов распознавания контуров внутри изображения становится неочевидным выбор какого-либо конкретного способа для определенных нужд. В данной статье рассматриваются основные алгоритмы на примере их применимости к конкретной прикладной задаче выделения контуров на Dicom-изображении печени здорового и больного человека. Сложность данной задачи заключается в размытости контура печени у больного человека, что требует применения более точных методов, позволяющих лечащему врачу принимать более обоснованные решения при определении диагноза.

2. Поэтапное распознавание изображений

Первым, и необязательным, этапом является необходимость размыть изображение. Выполняется эта операция из соображений более точного определения границ, так как шаг между градациями цветов будет выше, нежели на оригинальном изображении. Существует достаточно много фильтров, обеспечивающих сглаживание (рис. 1).

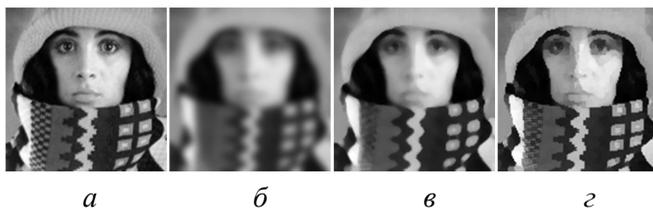


Рис. 1. Обработка входного изображения: а – исходное; б – фильтр Гаусса; в – фильтр медианный; г – фильтр Kuwahara

Наиболее точным в лабораторных условиях оказался фильтр Kuwahara, особенно в сером градиенте, что используется достаточно часто. Дополнительным «бонусом» является побочная чистка изображения от графического шума, что избавляет от необходимости дополнительной обработки входных данных.

Фильтр Kuwahara выполняет нелинейную фильтрацию изображений с сохранением резких краев. После фильтрации изображение похоже на грубо нарисованную красками картину. Суть алгоритма состоит в следующем (рис. 2):

1. В окрестности каждого пикселя применить маску размером $(2r + 1) * (2r + 1)$.
2. Окрестность разделить на четыре области, указанные цифрами I, II, III, IV, размером $r * r$.
3. Вычислить среднюю интенсивность и дисперсию в каждой из областей I, II, III, IV.
4. Присвоить центральному пикселю X среднее значение интенсивности той области, дисперсия которой наименьшая.

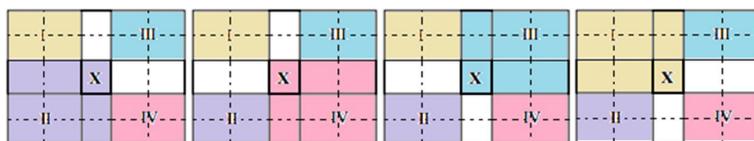


Рис. 2. Маска фильтра

Применение выбранного фильтра освобождает от необходимости предварительного очищения изображения от шумов, забирая эту функцию на себя. Причём информация о границах объектов в изображении будет сохранена. Применяем к исходному изображению фильтр Kuwahara. На рис. 3 слева показано исходное изображение, а на рис. 3 справа – изображение после применения фильтра Kuwahara.

Хорошо видно, что контуры изображения стали наиболее заметны и к данному рисунку возможно применить контурный фильтр. В данном случае будем использовать детектор границ Кэнни [1], использующий, в свою очередь, фильтр Собеля.



Рис. 3. Исходное изображение (слева) и рисунок, обработанный фильтром Kuwahara (справа)

Для функционирования оператора требуется две матрицы. По ним к входному изображению применяется свертка

$$G_y = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} * A, \quad G_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} * A$$

В каждой точке изображения приближенное значение градиента можно вычислить, используя полученные приближенные значения производных по следующей формуле:

$$(1) \quad G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2},$$

где A – исходное изображение; G_x и G_y – результат (число) операции свертки по выбранным матрицам, а знак $*$ обозначает саму двумерную операцию свертки. При этом считается, что координата x возрастает слева направо, а y – сверху вниз.

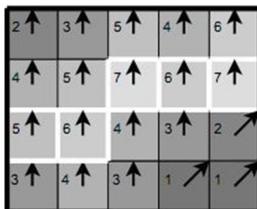


Рис. 4. Принцип подавления границ

Действие алгоритма сводится к тому, что вначале производится поиск градиентов, т.е. границы будут отмечаться там, где градиент изображения приобретает максимальное значение.

Только локальные максимумы будут отмечены как границы, а потенциальные границы будут определены порогами. Итоговые границы определяются путем подавления всех краев, не связанных с определенными (сильными) границами. Принцип такого подавления проиллюстрирован на рис. 4. Таким образом, из исходного изображения будет получен его контурный вариант.

На рис. 5 показан конечный результат изображения. Полученные контуры продемонстрированы на снимке печени как пример применения алгоритмов. Следует обратить внимание, что в данном случае также применен фильтр по минимальному радиусу и позиционированию контура для отсеечения ложных выделений. Но только получить данный контур недостаточно. Его нужно представить в виде кода, который можно было бы хранить.



Рис. 5. Пример работы оператора Кэнни

Один из наиболее используемых методов кодирования контуров – цепной код Фримена. Цепные коды применяются для конвертации границы в последовательность прямых определенной длины и указателя направления. В основе этого лежит 2- или 3-битная решетка на 4 и 8 направления соответственно. Длина определяется разрешением решетки, а направление – указателем из решетки (рис. 6).

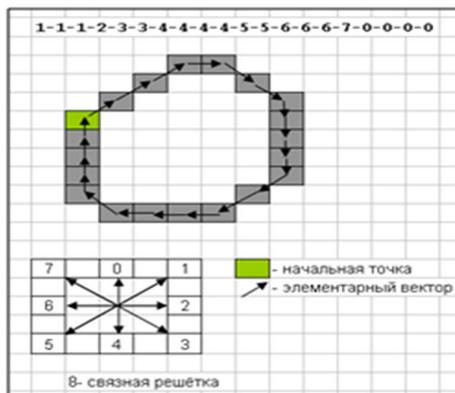


Рис. 6. Цепной код Фримена

На контуре фиксируется точка, которая называется начальной точкой. Затем контур обходится, и каждый вектор смещения записывается комплексным числом $a+ib$, где a – смещение точки по оси X , а b – смещение по оси Y . Смещение берется относительно предыдущей точки. При таком подходе контур определяется как совокупность элементарных векторов, представленных своими двумерными координатами. Изменение начальной точки приведет к циклическому сдвигу вектора-контура, а изменение масштаба изображения можно рассматривать как умножение элементарного вектора на масштабный коэффициент.

Скалярным произведением контуров $N1$ и $N2$ называется такое комплексное число[2]

$$(2) \quad \eta = (N1, N2) = \sum_{n=0}^{k-1} (\gamma_n, v_n),$$

где k – размерность вектора-контура; γ_n – n -й элементарный вектор контура $N2$; v_n – n -й элементарный вектор контура $N1$, (γ_n, v_n) – скалярное произведение комплексных чисел, вычисляемых как

$$(3) \quad (a+ib, c+id) = (a+ib)(c-id) = ac+bd+i(bc-ad).$$

Действительная часть скалярного произведения комплексных чисел совпадает со скалярным произведением соответ-

вующих векторов, т.е. включает в себя векторное скалярное произведение. Чем больше значение скалярного произведения, тем «ближе» векторы друг к другу. Для перпендикулярных векторов оно будет равно нулю, станет отрицательным для векторов, направленных в разные стороны, а для коллинеарных – будет иметь максимальное значение.

Нормированное скалярное произведение (НСП), определяемое в пространстве комплексных чисел, также является комплексным числом. При этом, единица – это максимально возможное значение модуля НСП и она достигается только при выполнении определенного условия.

$$(4) \quad \eta = \frac{(N2, N1)}{|N2| |N1|},$$

где $|N1|$ и $|N2|$ – нормы (длины) контуров, которые вычисляются как

$$(5) \quad |N2| = \left(\sum_{n=0}^{k-1} |\gamma_n|^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$(6) \quad N2 = \mu N1,$$

где μ – произвольное комплексное число.

Исходя из физического смысла умножения комплексных чисел, получаем вывод, что модуль НСП достигнет максимального значения – единицы, только если контур $N2$ является тем же контуром $N1$, даже если он будет повернут на некоторый угол и промасштабирован на определенный коэффициент.

Но равенство (6) достигается только тогда, когда начальные точки контуров совпадают. В противном случае, даже если контуры одинаковы, модуль НСП таких контуров не будет равен единице. Для решения этой проблемы можно воспользоваться взаимокорреляционной функцией (ВКФ) двух контуров, значения которой показывают степень схожести контуров, если сдвинуть начальную точку N на m позиций:

$$(7) \quad \tau(m) = (N2, N1(m)),$$

где $N1(m)$ – контур, полученный из $N1$ путем циклического сдвига его элементарного вектора на m элементов. ВКФ определена на всем множестве целых чисел, но поскольку цикличе-

ский сдвиг на k приведет к исходному контуру, ВКФ имеет период k и нужно рассмотреть значения этой функции только в пределах от 0 до $k-1$.

Максимальный модуль среди значений ВКФ в показывает степень похожести контуров (достигает единицы для одинаковых контуров), а аргумент $\arg(\tau_{\max})$ дает угол поворота одного контура относительно другого.

$$(8) \quad \tau_{\max} = \max\left(\frac{\tau(m)}{|N2| |N1|}\right),$$

где $\tau(m)$ – модуль ВКФ; $|N1|$ и $|N2|$ – нормы (длины) контуров, определяемые формулами (5) и (6).

3. Заключение

Предложен гибридный метод распознавания контуров на изображении, включающий три основных этапа: размытие, выделение границ, сохранение границ. Данный подход был использован при решении задачи выделения границ печени человека, в которой условия работы алгоритма были наиболее сложными ввиду наличия малоразличимых градаций серого на снимках. Однако при подобном подходе все еще остается сложность определения того, что именно выделять, в случае если нам нужен только один контур, как в примере поиска органа человека. В случае если существует два контура этого же органа на снимке, данный подход не сработает ввиду ограничения только на один контур из-за схожего контура селезенки. Так или иначе эта проблема осталась открытой и требует дальнейшего рассмотрения.

Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта RFMEFI58617X0055. Название совместного проекта с ЕС в рамках программы "Горизонт 2020": "Fracture across Scales and Materials, Processes and Disciplines" Акроним проекта: "FRAMED".

Литература

1. ГОНСАЛЕС Р., ВУДС Р. *Цифровая обработка изображений*. – М.: Техносфера, 2005.
2. ВАНЮКОВА Д.И., ПОПОВ С.С., СОКОЛОВ П.А. *Совмещение цифрового картографического изображения местности с радиолокационным изображением [Электронный ресурс] // Навигация и управление движением: материалы XVI конференции молодых ученых*. – Санкт-Петербург, 2014, Март. – URL: <http://www.elektropribor.spb.ru/kmu2014/refs> (дата обращения: 10.07.2017).
3. ЯСНИЦКИЙ Л.Н. *Введение в искусственный интеллект: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений*. – М.: Академия, 2010. – 176 с.

DEVELOPMENT OF THE PROTOTYPE OF THE AUTOMATED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR DECOMPOSITION WHEN SEARCHING FOR CONTOURS ON DICOM FORMAT IMAGES

Roman Klestov, Perm National Research Polytechnic University, Perm, student (klestovroman@gmail.ru).

Valeriy Stolbov, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Doctor of Science, professor (valeriy.stolbov@gmail.com).

Abstract: A hybrid method for recognizing contours, which includes several stages of processing the original image is considered. Identify and describe the characteristics of existing methods for recognizing contours. A certain sequence of methods is proposed. Particular attention is paid to methods that ensure work with complex input data having a close to homogeneous structure. A mathematical feature of the work of each of the methods is described. Examples of output data are given when applying various image processing methods. Based on the practical use of each of the presented computer vision technologies, appropriate conclusions and recommendations are made. The quality of contour detection in the image in the illustrations is compared.

Keywords: recognizing contours, computer vision, complex method, Freeman Chain Code, Canny edge detector, Kuwahara.

УДК 519.872:656

ББК 30в6

СИСТЕМА МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ПОДКЛЮЧАЕМЫМ ПРИБОРОМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОМАГИСТРАЛИ С РЕВЕРСИВНОЙ ПОЛОСОЙ

Сысоев А.С.¹, Горяйнов А.О.²

(Липецкий государственный технический университет, Липецк)

Организация реверсивного движения — один из способов решения сложившейся тяжелой транспортной ситуации в современных крупных городах. В статье представлена система массового обслуживания для моделирования такого типа организации дорожного движения, а также способ выбора оптимального направления движения реверсивной полосы за счет решения поставленной задачи оптимизации.

Ключевые слова: система массового обслуживания, резервный прибор, автомагистраль, оптимизация.

Введение

Вопрос загруженности дорог стоит очень остро в современных развитых городах, где преобладает большое количество личных автотранспортных средств. Одновременный выезд автомобилей на отдельный участок приводит к образованию заторов. Все это влечет за собой необходимость поиска выходов из сложившейся ситуации. Одним из вариантов разрешения этой проблемы является организация полос реверсивного движения. Такие участки предполагают, что в зависимости от значения некоторого параметра, который может быть принят в качестве управляющего, полоса будет использоваться для движения в одном из направ-

¹ Антон Сергеевич Сысоев, кандидат технических наук, (anton_syssoyev@mail.ru).

² Александр Олегович Горяйнов, магистр прикладной математики.

лений. Такие дороги с реверсивным движением можно описать с помощью систем массового обслуживания с симметричным резервным прибором. Управление этим резервным прибором происходит по времени ожидания заявки в системе, а не по длине очереди. Принятие в качестве критерия переключения длины очереди было бы некорректным, так как очередь теряет свой смысл, когда транспортные средства в ней движутся с допустимой на данном участке скоростью. В данной работе рассматриваются построение и оптимизация системы управления реверсивными полосами на автодорогах с однотипным, симметричным резервным прибором, управляемым по текущему времени ожидания заявки, находящейся первой в очереди, позволяющей находить оптимальный момент включения резервного прибора (реверсивной полосы).

1. Система массового обслуживания с подключаемым резервным прибором

Рассмотрим однолинейную систему массового обслуживания с пуассоновским входящим потоком (интенсивность λ), к которой может быть подключен резервный прибор. Обслуживание предполагается экспоненциальным с интенсивностью μ_1 и μ_2 для основного и резервного приборов соответственно. Дисциплина обслуживания системы зависит от времени ожидания s заявки, находящейся в очереди первой, и описывается следующим правилом: как только s достигает величины s_1 , подключается резервный прибор и берет для обслуживания заявку, стоящую в очереди первой; после обслуживания одного требования резервный прибор выключается, если $s < s_0$, и продолжает работать, если $s \geq s_0$ ($s_0 < s_1$).

Так как поток заявок является простейшим, а обслуживание экспоненциальным, то s представляет собой марковский случайный процесс. Тогда финальная плотность вероятностей $P(s)$ величины s : для работы только основного прибора $P_1(s)$ в области $s \leq s_0$ и $P_2(s)$ в области $s_0 \leq s \leq s_1$, для работы основного и резервного приборов $P_3(s)$ в области $s \leq s_0$ и $P_4(s)$ в области

$s_0 \leq s \leq s_1$ и $P_5(s)$ в области $s \geq s_1$ [2].

Обратное уравнение Колмогорова с учетом возможных переходов за время Δt :

$$(1) \quad \begin{aligned} P_1(s) = & (1 - \mu_1 \Delta t) P_1(s - \Delta t) + \\ & + \mu_1 \Delta t \int_0^{s_0-s} \lambda e^{-\lambda v} P_1(s+v) dv + \\ & + \mu_1 \Delta t \int_{s_0-s}^{s_1-s} \lambda e^{-\lambda v} P_2(s+v) dv + (\mu_2 \Delta t) P_3(s), \end{aligned}$$

где v — интервал времени, через который поступило требование, следующее за находящимся в очереди первым [3]. Раскладывая (1) в Тейлора по Δt и переходя к пределу $\Delta t \rightarrow 0$, получим:

$$(2) \quad \begin{aligned} & \frac{dP_1(s)}{ds} + \mu_1 P_1(s) - \mu_2 P_3(s) = \\ & = \mu_1 \int_0^{s_0-s} \lambda e^{-\lambda v} P_1(s+v) dv + \mu_1 \int_{s_0-s}^{s_1-s} \lambda e^{-\lambda v} P_2(s+v) dv. \end{aligned}$$

Производя замену $(s+v) = y$, умножая на $e^{-\lambda v}$ и затем дифференцируя по s , приведем (2) к виду:

$$\frac{d^2 P_1(s)}{ds^2} + (\mu_1 - \lambda) \frac{dP_1(s)}{ds} - \mu_2 \frac{dP_3(s)}{ds} + \mu_2 \lambda P_3(s) = 0.$$

Аналогично получаем:

$$(3) \quad \frac{dP_2(s)}{ds} + \mu_1 P_2(s) = \mu_1 \int_0^{s_1-s} \lambda e^{-\lambda v} P_2(s+v) dv,$$

$$\frac{d^2 P_2(s)}{ds^2} + (\mu_1 - \lambda) \frac{dP_2(s)}{ds} = 0;$$

$$(4) \quad \begin{aligned} & \frac{dP_3(s)}{ds} + (\mu_1 + \mu_2) P_3(s) = \lambda e^{-\lambda(s_1-s)} P_2(s_1) + \\ & + \mu_1 \int_0^{s_0-s} \lambda e^{-\lambda v} P_3(s+v) dv + \\ & + (\mu_1 + \mu_2) \left(\int_{s_0-s}^{s_1-s} \lambda e^{-\lambda v} P_4(s+v) dv + \int_{s_1-s}^{\infty} \lambda e^{-\lambda v} P_5(s+v) dv \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{d^2 P_3(s)}{ds^2} + (\mu_1 + \mu_2 - \lambda) \frac{dP_3(s)}{ds} - \lambda \mu_2 P_3(s) = 0; \\
 & \frac{dP_4(s)}{ds} + (\mu_1 + \mu_2) P_4(s) - \lambda e^{-\lambda(s_1-s)} P_2(s_1) = \\
 (5) \quad & = (\mu_1 + \mu_2) \int_0^{s_1-s} \lambda e^{-\lambda v} P_4(s+v) dv + \\
 & + (\mu_1 + \mu_2) \int_{s_1-s}^{\infty} \lambda e^{-\lambda v} P_5(s+v) dv, \\
 & \frac{d^2 P_4(s)}{ds^2} + (\mu_1 + \mu_2 - \lambda) \frac{dP_4(s)}{ds} = 0;
 \end{aligned}$$

$$\frac{dP_5(s)}{ds} + (\mu_1 + \mu_2) P_5(s) = (\mu_1 + \mu_2) \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda v} P_5(s+v) dv.$$

Особого внимания требует рассмотрение моментов $s = s_0$ и $s = s_1$. Рассматривая переходы в точках $s = s_0$, получим:

$$\begin{aligned}
 P_2(s_0) &= (1 - \mu_1 \Delta t) P_1(s_0 - \Delta t) + \\
 &+ \mu_1 \Delta t \int_0^{s_1-s} \lambda e^{-\lambda v} P_2(s_0 + v) dv,
 \end{aligned}$$

откуда, после предельного перехода ($\Delta t \rightarrow 0$) $P_1(s_0) = P_2(s_0)$. Аналогично $P_3(s_0) = P_4(s_0)$.

Принимая в уравнениях (2)–(5) $s = s_0$ и сравнивая их правые части, можно получить выполнение остальных условий сшивания.

Обозначим через $\pi(0, 0)$ вероятность того, что в системе нет заявок, через $\pi(1, 0)$ — вероятность того, что в системе находится одна заявка, которая обслуживается основным прибором, через $\pi(0, 1)$ — вероятность нахождения в системе одной заявки, которая обслуживается резервным прибором и через $\pi(1, 1)$ — вероятность того, что в системе находятся две заявки, одна из

которых обслуживается основным прибором, а вторая — резервным. Рассматривая возможные переходы в точке $s = 0$, получим:

$$\begin{aligned}
 P_3(0) &= \lambda\pi(1, 1) + \mu_1\Delta t \int_0^{s_0} \lambda e^{-\lambda v} P_3(v) dv + \\
 &+ (\mu_1 + \mu_2) \Delta t \int_{s_0}^{s_1} \lambda e^{-\lambda v} P_4(v) dv + \\
 &+ (\mu_1 + \mu_2) \Delta t \int_{s_1}^{\infty} \lambda e^{-\lambda v} P_5(v) dv + \\
 &+ (1 - \mu_1\Delta t) \lambda \Delta t e^{-\lambda v} P_2(s_1 - \Delta t).
 \end{aligned}$$

Переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получим:

$$(6) \quad P_3(0) = \lambda\pi(1, 1).$$

Аналогичным образом можно получить:

$$(7) \quad P_1(0) = \lambda\pi(0, 1),$$

$$(8) \quad \lambda\pi(0, 0) = \mu_1\pi(1, 0) + \mu_2\pi(0, 1),$$

$$(9) \quad (\lambda + \mu_2)\pi(0, 1) = \mu_1\Pi(1, 1),$$

$$(\lambda + \mu_1)\pi(1, 0) - \lambda\pi(0, 0) - \mu_2\pi(1, 1) =$$

$$(10) \quad = \mu_1 \int_0^{s_0} e^{-\lambda v} P_1(v) dv + \mu_1 \int_{s_0}^{s_1} e^{-\lambda v} P_2(v) dv,$$

$$(\mu_1 + \mu_2 + \lambda)\pi(1, 1) - \lambda\pi(0, 1) =$$

$$(11) \quad = \mu_1 \int_0^{s_0} e^{-\lambda v} P_3(v) dv + (\mu_1 + \mu_2) \int_{s_0}^{s_1} e^{-\lambda v} P_4(v) dv +$$

$$+ (\mu_1 + \mu_2) \int_{s_1}^{\infty} e^{-\lambda v} P_5(v) dv + e^{-\lambda s_1} P_2(s_1).$$

Полагая в (2) и (4) $s = 0$ и сравнивая правые части с (10) и (11), получим:

$$(\lambda + \mu_1)\Pi(1, 0) - \lambda\Pi(0, 0) - \mu_2\Pi(1, 1) =$$

$$(12) \quad = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{dP_1(s)}{ds} \Big|_{s=0} + \mu_1 P_1(0) + \mu_2 P_3(0) \right],$$

$$(\mu_1 + \mu_2 + \lambda)\Pi(1, 1) - \lambda\Pi(0, 1) =$$

$$(13) \quad = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{dP_3(s)}{ds} \Big|_{s=0} + (\mu_1 + \mu_2) P_3(0) \right].$$

С учетом (6) и (7) соотношения (12) и (13) примут вид:

$$(14) \quad \left. \frac{dP_1(s)}{ds} \right|_{s=0} - \lambda P_1(0) = -\lambda^2 \Pi(0,0),$$

$$(15) \quad \left. \frac{dP_3(s)}{ds} \right|_{s=0} - \lambda P_3(0) = -\lambda^2 \Pi(0,0).$$

Получено шесть условий в нуле (6)–(9) и (14)–(15). Отметим, что одно из них является следствием остальных. К этим условиям следует добавить еще естественное условие $\lim_{s \rightarrow 0} P_5(s) = 0$ и условие нормировки:

$$\int_0^{s_0} [P_1(s) + P_3(s)] ds + \int_{s_0}^{s_1} [P_2(s) + P_4(s)] ds + \int_{s_1}^{\infty} P_5(s) ds + \Pi(0,0) + \Pi(0,1) + \Pi(1,0) + \Pi(1,1) = 1.$$

Выписанные уравнения для $P_1(s)$, $P_2(s)$, $P_3(s)$, $P_4(s)$, $P_5(s)$, условия сшивания, граничные условия при $s \rightarrow 0$ и $s \rightarrow \infty$, условия нормировки, определяют $P(s)$ однозначно. В силу громоздкости, решение не приводится. Его можно найти, например в [2].

2. Моделирование автомагистрали с реверсивной полосой

На основе математической модели, приведенной в предыдущем пункте, построим модель, позволяющую найти оптимальный момент подключения реверсивной полосы на автодорогах. Будем рассматривать такую автодорогу как систему массового обслуживания с резервным симметричным прибором и опишем ее случайным процессом с компонентами: $\{s(t), v(t)\}$, где $s(t)$ — текущее время ожидания транспортного средства, находящегося первым в очереди, $v(t)$ — число работающих полос в момент времени t . Кроме того, возможны еще три особых состояния системы:

- 1) $v(t) = 0$ — система пуста, в очереди нет ни одного транспортного средства;

- 2) $v(t) = 1$ – очередь пуста и функционирует только основная полоса движения;
- 3) $v(t) = 2$ – очередь пуста и функционируют основная полоса движения с подключенной реверсивной полосой.

Как только $s(t)$ – текущее время ожидания заявки в системе достигает некой величины $s_0 = const$, подключается резервный прибор.

Так как поток заявок является простейшим, а обслуживание экспоненциальное, то процесс $\{s(t), v(t)\}$ с состояниями $v(t) = 0, v(t) = 1, v(t) = 2$ представляет собой марковский случайный процесс. Достаточным условием существования стационарного режима работы рассматриваемой системы массового обслуживания является условие $\lambda < 2\mu$. Стоит также указать, что интенсивность обслуживания (пропускная способность полосы) резервного прибора совпадает с интенсивностью обслуживания (пропускной способностью основной полосы) основного прибора. Найдем финальную плотность вероятностей $P(s, v)$ величины (s, v) и финальные вероятности состояний:

$$\begin{aligned}
 P_1(s) &= \frac{\lambda^2 (\lambda - \mu) (\lambda - 2\mu) e^{(\lambda - \mu)s}}{\mu t}, \\
 P_2(s) &= \frac{\lambda^3 (\lambda - \mu) (\lambda - 2\mu) e^{\lambda s - \mu s_0}}{2\mu^2 t}, \\
 (16) \quad P_3(s) &= \frac{\lambda^3 (\lambda - \mu) (\lambda - 2\mu) e^{(\lambda - 2\mu)s + \mu s_0}}{2\mu^2 t}, \\
 \pi(0) &= \frac{(\lambda - \mu) (\lambda - 2\mu)}{t}, \quad \pi(1) = \frac{\lambda (\lambda - \mu) (\lambda - 2\mu)}{\mu t}, \\
 \pi(2) &= \frac{(\lambda - \mu) (\lambda - 2\mu)}{2\mu^2 t},
 \end{aligned}$$

где $t = \mu(2\mu - \lambda) - \lambda^2 e^{(\lambda - \mu)s_0}$, $\lambda > \mu$.

Если $\lambda = \mu$, то $p_i(s)$, $i = 1, 2, 3...$ и $\pi(v)$, $v = 1, 2, 3...$ имеют следующий вид:

$$P_1(s) = \frac{\lambda}{1 + \lambda s_0}, \quad P_2(s) = \frac{\lambda e^{\lambda(s-s_0)}}{2(1 + \lambda s_0)}, \quad P_3(s) = \frac{\lambda e^{\lambda(s_0-s)}}{2(1 + \lambda s_0)},$$

$$(17) \quad \pi(0) = \frac{\lambda}{1 + \lambda s_0}, \quad \pi(1) = \frac{\lambda}{1 + \lambda s_0}, \quad \pi(2) = \frac{e^{-\lambda s_0}}{2(1 + \lambda s_0)}.$$

3. Оптимизация системы

Естественным для рассмотрения является случай, когда в описываемой системе существуют два вида потерь — потери на ожидания заявки (транспортного средства) в очереди (такие потери могут, например, быть представлены количеством израсходованного топлива) и потери на амортизацию резервного прибора (например, износ дорожного полотна резервной полосы).

Нахождение заявок в системе, ожидающих обслуживания, приводит к потерям, которые будут называться потерями на ожидание. Будем считать, что если в очереди находится i заявок, то потери в единицу времени равны $F(i)$. Найдем математическое ожидание $M(F(i))$ этих потерь. Пусть в какой-то момент времени заявка, находящаяся в очереди первой, ожидает обслуживания в течение времени s . За это время с вероятностью $\frac{(\lambda s)^{i-1} e^{-\lambda s}}{(i-1)!}$, пришла еще одна $i-1$ заявка. Таким образом условное распределение числа заявок в очереди i есть

$$P\left(\frac{i}{s}\right) = \frac{(\lambda s)^{i-1} e^{-\lambda s}}{(i-1)!}, \quad i = 1, 2, \dots$$

Тогда среднее значение потерь можно записать в виде [4]:

$$(18) \quad L_1 = M[F(i)] = \int_0^{s_0} F(s) [p_1(s) + p_2(s)] ds +$$

$$+ \int_{s_0}^{\infty} F(s) p_3(s) ds,$$

где

$$F(s) = \sum_{i=1}^{\infty} F(i) \frac{(\lambda s)^{i-1} e^{-\lambda s}}{(i-1)!}.$$

В частности, если потери пропорциональны числу заявок, находящихся в очереди $F(i) = D_1(i)$, то $F(s) = D_1(\lambda s + 1)$,

где D_1 — положительная константа, имеющая смысл потерь от ожидания одной заявки в единицу времени.

Будем считать, что работа резервного прибора приводит к потерям в единицу времени, равным D_2 . Тогда среднее значение потерь на амортизацию резервного прибора в единицу времени имеет вид:

$$(19) \quad L_2 = D_2 \left[\pi(2) + \int_0^{s_0} p_2(s) ds + \int_{s_0}^{\infty} p_3(s) ds \right].$$

Таким образом, средние суммарные потери системы массового обслуживания в единицу времени примут вид [3, 5]

$$(20) \quad \begin{aligned} L(s_0) &= L_1 + L_2 = \\ &= \int_0^{s_0} F(s) [p_1(s) + p_2(s)] ds + \int_{s_0}^{\infty} F(s) p_3(s) ds + \\ &+ D_2 \left[\pi(2) + \int_0^{s_0} p_2(s) ds + \int_{s_0}^{\infty} p_3(s) ds \right] ds, \end{aligned}$$

где $p_1(s)$, $p_2(s)$, $p_3(s)$, $\pi(2)$, для значений $\lambda = \mu$ и $\lambda \neq \mu$ имеют соответственно вид (18) и (19).

Задача оптимизации такой системы массового обслуживания сводится к нахождению момента x_{opt} включения резервного прибора, который минимизирует функцию общих потерь (20).

Рассмотрим систему массового обслуживания, в которой функция потерь линейно зависящей от числа заявок в системе $F(i) = D_1(i)$, где D_1 — потери от ожидания одной заявки в единицу времени. Тогда средние суммарные потери системы в единицу времени имеют вид:

$$(21) \quad \begin{aligned} L(s_0) &= \\ &= D_1 \left[\int_0^{s_0} (\lambda s - 1) [p_1(s) + p_2(s)] ds + \int_{s_0}^{\infty} (\lambda s - 1) p_3(s) ds \right] + \\ &+ D_2 \left[\pi(2) + \int_0^{s_0} p_2(s) ds + \int_{s_0}^{\infty} p_3(s) ds \right] ds. \end{aligned}$$

Перейдем к безразмерным величинам $\omega = \frac{\mu}{\lambda}$, $x_0 = \lambda s_0$, принимая во внимание (18) и (19), перепишем функцию общих потерь в виде:

$$(22) \quad L(x_0) = D_1 \tilde{E}(x_0) + D_2 \tilde{K}(x_0).$$

При $\omega \neq 1$

$$\begin{aligned}\tilde{E}(x_0) &= \frac{e^{(1-\omega)x_0}}{\omega m} \left[\frac{(1-2\omega)\omega}{1-\omega} \left(e^{(\omega-1)x_0} \right) - \omega x_0 + \frac{1-\omega}{1-2\omega} \right], \\ \tilde{K}(x_0) &= \frac{(1-\omega)e^{(1-\omega)x_0}}{\omega m}, \\ m &= (2\omega - 1)\omega - e^{(1-\omega)x_0}.\end{aligned}$$

При $\omega = 1$

$$\begin{aligned}\tilde{E}(x_0) &= \frac{x_0^2 + 4x_0 + 2}{2(1+x_0)}, \\ \tilde{K}(x_0) &= \frac{1}{1+x_0}.\end{aligned}$$

Аналитически решить задачу нахождения оптимального момента включения резервного прибора x_{opt} который минимизирует функцию общих потерь, получилось только для $\omega = 1$. Если $\omega = 1, \frac{D_1}{D_2} < 1$, то

$$(23) \quad x_0^{opt} = -1 + \sqrt{2 \frac{D_2}{D_1} - 1}.$$

Для значений $\omega \neq 1$ задача оптимизации решена численно (метод оптимизации – BFGS [1]).

4. Численный эксперимент

Для численных расчетов было разработано программное обеспечение в среде Qt. Структурно программа представляет собой систему поддержки принятия решений, которая может быть использована как в онлайн-режиме (при наличии поступления данных об интенсивности и о пропускной способности полосы движения), так и в режиме офф-лайн (для анализа сложившейся ситуации и оценки перспектив ее дальнейшего развития). Функционально каждая из полос движения моделируется системой массового обслуживания с подключаемой реверсивной полосой. В качестве интенсивностей обслуживания основного и резервного приборов (пропускной способности основной и реверсивной полосы) было выбрано рекомендованное значение 1800

прив.авт./ч [6]. В зависимости от значений интенсивностей движения и пропускных способностей, а также потерь различных типов параллельно решаются две оптимизационные задачи — для прямого и обратного направлений движения. В качестве реверсивного выбирается то направление, оптимальный момент времени включения резервного прибора для которого меньше.

Литература

1. ДЭННИС ДЖ., ШНАБЕЛЬ Р. *Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений* / Пер. с англ. – Москва: Мир, 1988. – 440 с.
2. ЗИНОВЬЕВА Л.И. *Система массового обслуживания с гистерезисом и резервным прибором, управляемым временем ожидания* // Математическая статистика и ее приложения. – Омск: Изд-во ОТГУ. – 1980. – 6. – С. 152-164.
3. ЗИНОВЬЕВА Л.И., ТЕРПУГОВ А.Ф. *Однолинейная система массового обслуживания с переменной интенсивностью, зависящей от времени ожидания* // Автоматика и телемеханика. – 1981. – 1. – С. 27-30.
4. САМОЧЕРНОВА Л.И. *Оптимизация системы массового обслуживания с резервным прибором с управлением, зависящим от времени ожидания* // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – 5. – С. 94-97.
5. САМОЧЕРНОВА Л.И., ПЕТРОВ Е.С. *Оптимизация системы массового обслуживания с односторонним резервным прибором* // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – 5. – С. 28-31.
6. *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, Washington, D.C. 2000. ISBN 0-309-06681-6.

QUEUING SYSTEM WITH ADDITIONAL SERVER TO SIMULATE HIGHWAY WITH REVERSE LINE

Anton Sysoev, Lipetsk State Technical University, Lipetsk,

Cand.Sc., assistant professor (anton_syssoyev@mail.ru).

Aleksandr Goriaynov, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, M.Sc.

Abstract: Reverse road traffic organization is a way to solve the current difficult traffic situation in a large city. The paper presents a queuing system for modeling this type of traffic management, as well as the method to selecting the optimal direction of a reverse-line functioning by solving an optimization problem.

Keywords: queuing system, reserve server, highway, optimization.

УДК 004.942

ББК 34.1

КОРРЕКТИРОВКА ПЛАНА ЗАГРУЖЕННОСТИ АГРЕГАТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦЕХА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Широков А.С.¹

(Липецкий государственный технический университет, Липецк)

В работе представлены общие подходы к использованию имитационного моделирования в среде GPSS для нахождения оптимального распределения движения заготовок по альтернативным маршрутам на производстве в случае появления нового оборудования или изменения производительности существующего. Представлен интерфейс программы, позволяющей из схемы движения заготовок и настроенных параметров обработки на каждом из агрегатов получить имитационную модель. Представлены подходы к формированию целевой функции для получения оптимального распределения движения заготовок по альтернативным маршрутам.

Ключевые слова: имитационное моделирование, прокатное производство, оптимизация.

Введение

Задача моделирования технологического процесса появилась на производстве ПАО НЛМК, когда было принято решение расширить Производство холоднокатаного проката за счет установки дополнительного агрегата – реверсивного прокатного стана. На момент решения внедрения данного агрегата на Производство необходимо было проверить, что введение данного агрега-

¹ Широков Андрей Сергеевич, аспирант, (shirokov.as@mail.ru).

та в производственный процесс не повлечет за собой перегрузку действующего оборудования (производственных агрегатов и транспортных средств), что могло бы повлечь за собой остановку Производства в целом [5].

Для проверки работоспособности Производства после введения в эксплуатацию дополнительного оборудования были построены имитационные модели для случаев до введения дополнительного оборудования и после его внедрения. Имитационные модели показали высокую но допустимую загруженность агрегатов Производства после предполагаемого ввода в эксплуатацию реверсивного стана холоднокатаного проката [1].

1. Постановка задачи

Дополнительно к задаче проверки работоспособности Производства встала задача возможного перераспределения нагрузки между агрегатами сходного назначения. Например, для холоднокатаного проката могут быть использованы пятиклетевой прокатный стан или установленный реверсивный прокатный стан, для отжига и последующей дрессировки стали могут быть использованы колпаковая печь + дрессировочный агрегат или один агрегат непрерывного отжига, а для оцинкования может быть использован один из имеющихся агрегатов непрерывного горячего цинкования. Для каждого из вариантов может быть по-разному задана нагрузка на имеющийся транспорт. В итоге, решить, сколько рулонов пускать на каждый агрегат, можно было бы только с учетом производительности агрегатов и транспорта. Учесть элемент случайности, который имеется на любом производстве, при таком подходе практически невозможно.

2. Решение

Для определения оптимальной загруженности агрегатов с исследованием элементов случайности было принято решение написать программу, которая с использованием графического интерфейса позволяла бы задать общий план возможных маршру-

тов между агрегатами, настроить временные параметры обработки каждым агрегатом заготовки, а затем построить по этим данным имитационную модель производства, которая впоследствии могла бы быть использована для поиска некоторого оптимального плана загрузки агрегатов [4]. Использование графического представления движения заготовок упрощает задачу получения имитационной модели, так как визуальная схема процесса настраивается проще, чем программный код на языке GPSS. В качестве достоинства такого подхода может быть выделена легкая модифицируемость уже настроенной модели: на схеме можно значительно быстрее найти изменяемый участок и его перенастроить. Пример схемы одного из маршрутов движения рулонов на Производстве холоднокатаного проката для построения модели приведен на рис. 1.

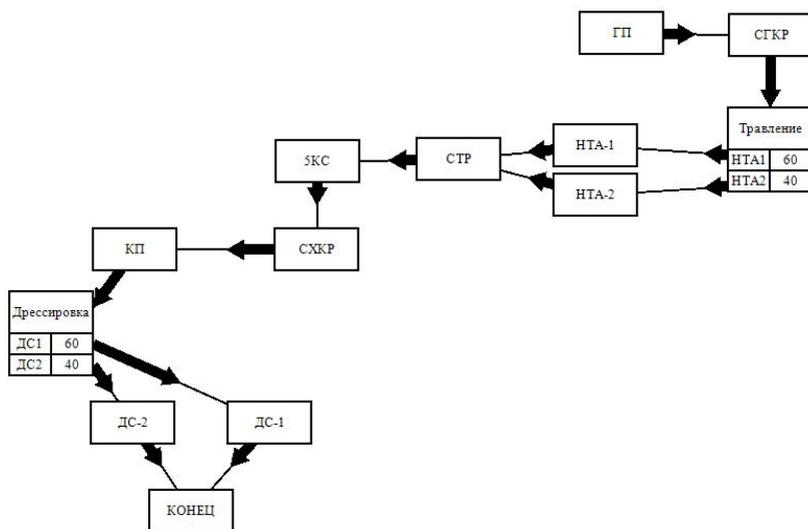


Рис. 1. Схема движения рулонов на Производстве холоднокатаного проката, соответствующая технологической обработке: травление – холоднокатаный прокат – отжиг – дрессировка

На схеме представлена часть агрегатов, наиболее затрагиваемая

мых при установке реверсивного прокатного стана. ГП – горячекатаный прокат (предыдущая стадия обработки рулонов), СГКР – склад горячекатаных рулонов, Травление – момент распределения рулонов по непрерывным травильным агрегатам (возле соответствующего агрегата подписан процент рулонов, следующих к данному агрегату), НТА-1 и НТА-2 – непрерывные травильные агрегаты, СТР – склад травленых рулонов, 5КС – пятиклетевой стан непрерывного холоднокатаного проката, СХКР – склад холоднокатаных рулонов, КП – колпаковые печи, Дрессировка – момент распределения рулонов между дрессировочными станами, ДС-1 и ДС-2 – дрессировочные станы.

При построении модели можно сразу заложить, какие величины в схеме могут изменяться (в процессе поиска оптимальности загрузки агрегатов), а также можно установить зависимости между изменяемыми величинами. В качестве искомой величины можно заложить процент заготовок, который будет направлен к определенному агрегату среди аналогичных. В качестве примера можно рассмотреть оцинкование металла на одном из агрегатов непрерывного горячего цинкования (АНГЦ-1, АНГЦ-3, АНГЦ-5) после обработки рулона на стане холоднокатаного проката. Данные агрегаты расположены так, что для доставки к ним стали будет использоваться различный транспорт, который может быть загружен также рулонами, перемещаемой с иными целями. Поэтому невозможно сразу сказать, какой процент рулонов должен направляться к каждому из агрегатов. С целью поиска процентов рулонов, направляемых к каждому из агрегатов, в модели можно ввести переменные, которые впоследствии будут программно изменяться для получения новых моделей, проверяемых с использованием симуляции на соответствие требованиям Производства. При этом можно учесть взаимозависимость между переменными. Например, если 100 % рулонов должны пройти обработку на агрегатах непрерывного горячего цинкования, то на первый агрегат может пойти X_1 процентов рулонов, где X_1 может изменяться от 0 до 100, на другой агрегат может пойти X_2 процентов рулонов, где X_2 может изменяться от 0 до 100 – X_1 , а на оставшийся

агрегат должно пойти $100 - X1 - X2$ процентов рулонов (рис. 2).

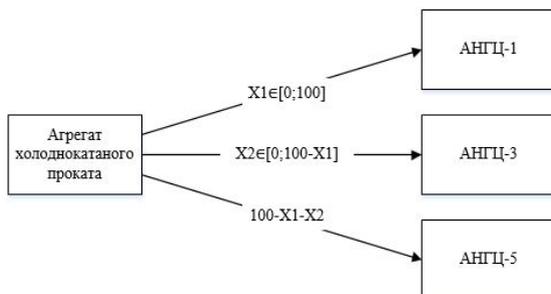


Рис. 2. Настройка переменных, отвечающих за распределение рулонов по взаимозаменяемым агрегатам

Чтобы поиск произошел максимально быстро, можно задать начальные значения для каждой из переменных, исходя из опыта компетентного сотрудника. Дальнейшие операции по вычислению оптимальных значений будут происходить автоматически. Так как модель не позволяет направленно искать оптимальные значения переменных (например, с использованием градиентов), то наиболее приемлемым способом будет нахождение значений переменных с использованием метода оптимизации “покоординатный спуск” [2], где на каждой итерации будет искаться значение одной из всех переменных, которое обеспечивает оптимальный план загрузки агрегатов относительно других значений этой же переменной.

Так как речь идет об оптимизации, то необходимо сформировать целевую функцию, значение которой должно в итоге быть оптимальным относительно значений при остальных исследуемых значениях переменных модели. Невозможно сформировать универсальную целевую функцию для всех возможных производств, потому можно лишь сформулировать подход к формированию данной функции. Выходные параметры, которые можно использовать в качестве части целевой функции, – величины статистики, которые позволяет получить среда GPSS по результатам

моделирования [3]:

- загруженность агрегата (доля времени, когда агрегат занят обработкой заготовок);
- доступность агрегата (доля времени, когда агрегат был доступен);
- среднее количество заготовок в очереди (на складе);
- пиковое (максимальное) количество заготовок в очереди (на складе);
- среднее время пребывания заготовки в очереди (на складе).

При исследовании данных параметров в зависимости от конкретной ситуации можно стремиться к достижению различных целей. Например, при наличии альтернативных агрегатов можно стремиться максимально загрузить один из агрегатов, при этом максимально разгрузив остальные, чтобы их можно было периодически выключать. Перегрузки склада бывают возможными, если рядом есть место, которое временно можно занять, а бывают ситуации, когда за пределы склада выйти невозможно. Среднее время пребывания на складе может быть критично, когда технологический процесс ограничивает пребывание заготовки между агрегатами.

Исходя из всех подобных соображений специалист может собрать целевую функцию из нежелательных исходов, которую впоследствии можно минимизировать. Например, за пиковое превышение количества заготовок на складе может быть назначен штраф в 1 единицу за каждую заготовку, а за превышения среднего количества заготовок на складе – 10 единиц за каждую заготовку. Штрафы должны быть предусмотрены для каждого склада и каждой единицы оборудования на производстве. В результате будет собрана целевая функция из штрафов:

$$(1) \quad F = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J a_{ij} Q_{ij} + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M b_{nm} E_{nm}$$

где Q_{ij} – количество заготовок, нарушающих регламент i по складу j ; a_{ij} – коэффициент, указывающий величину штрафа за нарушение одной заготовкой соответствующего регламента по соответствующему складу; E_{nm} – количество заготовок, нарушающих регламент n по агрегату m ; b_{nm} – коэффициент, указывающий величину штрафа за нарушение одной заготовкой соответствующего регламента по соответствующему агрегату.

Соответственно, чем меньшее значение принимает целевая функция F (функция штрафов), тем меньше нарушений получается в результате симуляции производства по модели. Если возможно получить модель, которая даст нулевое значение целевой функции F , то данную модель можно будет считать оптимальной, а распределение маршрутов движения заготовок по Производству – соответствующим требованиям к производственному процессу. Сама целевая функция должна быть построена для каждого случая индивидуально компетентным специалистом.

Использование оптимизации на основе имитационной модели выгодно использовать, когда сложно построить аналитическую модель производственного процесса из-за сложности видов распределения времени обработки заготовок на агрегатах, времени хранения на складах, времени транспортировки между агрегатами, как в случае Производства холоднокатаного проката [1]. Использование имитационной модели позволяет быстро построить модель производства на основе эмпирических данных о производстве, которые могли быть собраны ранее. В этом случае можно использовать распределения, представленные гистограммами, описывающими любое распределение с требуемой точностью. Использование данных о предыдущих периодах времени для построения модели позволит произвести симуляцию производственного процесса, если в него вводятся какие-нибудь изменения, в частности, ввод в эксплуатацию новой единицы оборудования. В этом случае актуальна задача нахождения оптимального распределения металла по маршрутам, так как могут появиться новые маршруты с изначально нулевым распределением на них количеством изделий.

3. Результаты

Была разработана программа, позволяющая с использованием графического интерфейса построить схему производственного процесса, а также настроить параметры всех агрегатов и складов, участвующих в производстве. Используя введенные данные, программа строит модель GPSS, которая впоследствии может быть запущена в интерпретаторе кода GPSS, где произойдет симуляция производственного процесса и будут получены результаты симуляции в виде статистики по агрегатам и складам. Разработан подход к программному поиску параметров распределения заготовок между альтернативными агрегатами с целью получения такого распределения, при котором производственный процесс будет максимально соответствовать требованиям, определенным компетентным сотрудником.

Литература

1. КАЧАНОВСКИЙ Ю.П. *Использование имитационного моделирования для определения основных характеристик загруженности производственного цеха* / Ю.П. Качановский, А.С. Широков // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – № 1. – С. 66-72.
2. ПАНТЕЛЕЕВ А.В. *Методы оптимизации в примерах и задачах* : Учеб. пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – 2-е изд., исправл. – М.: Высш. шк., – 2005. – 544 с.
3. ТОМАШЕВСКИЙ В.Н. *Имитационное моделирование в среде GPSS* / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова. – М.: Бестселлер, – 2003. – 416 с.
4. ШИРОКОВ А.С. *Алгоритм оптимизации выбора маршрутов для обработки продукции на производстве с использованием имитационного моделирования* // Новые информационные технологии в науке: сборник статей Международной научно-практической конференции (18 апреля 2017 г., г. Уфа). В 3 ч. Ч.3 – Уфа: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, – 2017. – С. 146-149.

5. ШИРОКОВ А.С. *Планирование производительности цеха в условиях изменения производственных мощностей на примере ПХПП НЛМК // Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания: материалы областного профильного семинара “Школа молодых ученых” по проблемам естественных наук. – Липецк: ЛГПУ, – 2015. – С. 191-196.*

ADJUSTMENT OF THE UTILIZATION PLAN OF THE INDUSTRIAL UNITS IN DEPENDING ON CHANGING PRODUCTION CAPACITIES ON THE BASIS OF SIMULATION MODELING

Andrew Shirokov, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, graduate student (shirokov@mail.ru).

Abstract: In work the general approaches to use of simulation modeling in the GPSS environment for finding of optimum distribution of the procurements movement along alternative routes on production in case of the new equipment or change of performance of existing equipments are provided. The interface of the program allowing from the traffic pattern of procurements and the configured processing settings on each of units to receive a simulation model is represented. Approaches to forming of target function for receiving optimum distribution of the movement of procurements along alternative routes are given.

Keywords: simulation modeling, rolling production, optimization.