



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



Тамбов, 10 – 13 сентября 2019 г.

**Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2019**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

**Материалы XVI Всероссийской
школы-конференции молодых ученых**

г. Тамбов 10 – 13 сентября 2019 г.

Научное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2019

УДК 004
ББК я54
У67

Редакционная коллегия:

- Д. Ю. Муромцев** – проректор по научно-инновационной деятельности
ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, профессор;
М. В. Губко – заместитель директора Института проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор РАН;
Ю. Ю. Громов – директор Института автоматизации и информационных
технологий ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, профессор;
И. А. Елизаров – секретарь конференции, канд. техн. наук,
доцент ФГБОУ ВО «ТГТУ»

У67 **Управление** большими системами [Электронный ресурс] : материа-
лы XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых. – Тамбов :
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – 1 электрон. опт. диск
(CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ;
CD-ROM-дисковод ; 15,5 Мб ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. –
Загл. с экрана.
ISBN 978-5-8265-2117-5.

Представлены материалы XVI Всероссийской школы-конференции моло-
дых ученых «Управление большими системами». Включает четыре раздела:
«Фундаментальные математические основы теории управления», «Управление
техническими системами и технологическими процессами», «Управление
организационными, социально-экономическими и биологическими системами»,
«Информационные технологии в управлении».

УДК 004
ББК я54

Материалы статей предоставлены в электронном виде
и сохраняют авторскую редакцию.

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2117-5

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Тамбовский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Секция I. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ

<i>Горинов А. А.</i> Нахождение решений для систем эволюционных дифференциальных уравнений методом конечномерных динамик	9
<i>Мухина С. С., Кушнер А. Г.</i> Многочленные и разрывные решения квазилинейных дифференциальных уравнений первого порядка и задачи управления в сплошных средах ...	14
<i>Блюмин С. Л., Галкин А. В., Левина Л. В., Орешина М. Н.</i> Матричные представления дискретизированных моделей распределенных систем управления	19
<i>Копылов С. А., Минин Ю. В.</i> Задача синтеза информационной системы с нечеткими параметрами	24
<i>Копылов С. А., Минин Ю. В.</i> Задача синтеза информационной системы с комбинаторной топологией в условиях неопределенности	27
<i>Пчелинцев А. Н.</i> О построении приближенных периодических решений системы Лоренца	30

ДИСКРЕТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И ТЕОРИЯ РАСПИСАНИЙ

<i>Чернышова Л. С., Галкин А. В.</i> Оптимизация плана обслуживания многокомпонентного технического устройства	35
<i>Лемкина М. В., Канавалов И. А., Praveen P. K.</i> Структура программного комплекса управляющей системы календарным планированием	39
<i>Галахов С. А., Гришин Е. М.</i> Построение расписания работы локомотивного депо	43
<i>Гришин Е. М., Галахов С. А., Правдивец Н. А.</i> Подходы к составлению расписания обслуживания парка локомотивов	47
<i>Истомин В. А., Галкин А. В.</i> Формирование начальных популяций монтажных партий на станах горячего проката	52
<i>Правдивец Н. А., Архипов Д. И., Тарасов И. А.</i> Задача построения плана проекта с ресурсными ограничениями: связь между моментами начала выполнения работ и отношениями предшествования	57
<i>Елфимова Я. А.</i> Логистика в строительном производстве. Управление затратами в логистических системах	62
<i>Красных М. А., Точеная О. Н.</i> Эффект от внедрения информационной системы управления временными интервалами на складе металлопродукции	66
<i>Гуськова Е. С., Блюмин С. Л.</i> Решение задачи дискретной оптимизации в многокритериальной системе	70
<i>Ухин А. Л.</i> Модели и алгоритмы оптимального планирования учебного процесса	74
<i>Белоусов В. Е., Баркалов С. А., Нижегородов К. А.</i> Ресурсно-временной анализ в задачах календарного планирования строительных предприятий	78
<i>Порядина В. Л., Косой Н. С.</i> Модель целевой координации при конкурсном управлении социально-экономическими проектами	83

Секция II. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

<i>Богомолов В. Ю., Абоносимов О. А., Протасов Д. Н., Лазарев Д. С., Котенев С. И.</i> Математический подход при прогнозировании процесса электробаромембранного разделения технологических растворов	86
<i>Акулинин Е. И., Голубятников О. О., Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И.</i> Оптимизация и управление в циклических адсорбционных системах разделения газовых смесей	91
<i>Атрепьев А. Ю., Галкин А. В.</i> Построение иммитационной модели производства агломерата	97
<i>Коновалов Д. Н., Лазарев С. И., Ковалев С. В.</i> Применение наночистотного и электронаночистотного процесса разделения технологических растворов гальванических производств на АО «Завод Тамбовполимермаш» и АО «ТАГАТ» имени С. И. Лившица	102
<i>Милосердов О. А., Губко М. В.</i> Классификация стеклообразных полимеров по транспортным свойствам на основе локальной геометрии полимерных цепей	107
<i>Шестаков К. В., Лазарев С. И., Хохлов П. А.</i> Управление технологической эффективностью мембранных процессов очистки промышленных растворов и стоков	110
<i>Скворцов С. А., Толстошеин С. С.</i> Система управления процессом концентрирования углекислого газа в системе жизнеобеспечения в замкнутом объеме	113
<i>Дабас М. Р., Орешина М. Н.</i> Моделирование распределения температуры в рабочих валках стана горячей прокатки	117
<i>Кербель В. А., Ложкин М. А., Третьяков А. А.</i> Система управления процессом производства пигмента красного	122
<i>Инютин Д. М., Сысоев А. С.</i> Сравнительный анализ методов аппроксимации как средств моделирования геометрии профиля горячего проката	126
<i>Беляев Н. Г., Елизаров И. А., Назаров В. Н.</i> Исследование нейросетевой системы регуляции, построенной на базе сети MLP	131
<i>Кербель В. А., Ложкин М. А., Елизаров И. А., Назаров В. Н., Третьяков А. А.</i> Система управления брагоректификационной установкой	135
<i>Головин Д. Ю., Дивин А. Г., Самодуров А. А., Тюрин А. И., Головин Ю. И.</i> Термографические методы и средства для измерения температуропроводности и дефектоскопии керамических и композитных материалов	141

РОБОТОТЕХНИКА

<i>Кокунько Ю. Г.</i> Каскадный синтез инвариантной системы слежения для БПЛА	147
<i>Шнайдер А. А., Мартиросов С. А., Алферов Ю. В., Семенюк А. В.</i> Вопросы применения SDR для анализа радиоэлектронной обстановки при управлении БПЛА	152
<i>Трефилов П. М., Кулагин К. А., Мигачев А. Н.</i> Применение виртуальных полигонов для отработки сценариев группового управления бпла мультикоптерного типа	156
<i>Краснов Д. В.</i> Оценка погрешности позиционирования манипулятора в системах с динамической обратной связью	160
<i>Шутова К. Ю., Браништов С. А.</i> Методы потенциальных и социальных сил движения мобильного робота	164
<i>Алферов Ю. В., Мартиросов С. А., Семенюк А. В., Шнайдер А. А.</i> Разработка интерфейса сканера частот для управления робототехнического комплекса	171
<i>Харланова П. М.</i> Исследование применения стратегии стайного поведения в ограниченных пространствах	175

<i>Литун С. И.</i> Уточнение индекса геомагнитной возмущенности по траекторным данным тестового спутника «СФЕРА»	178
<i>Блинов К. С., Егоров А. С.</i> Управление системой сортировки с использованием коллаборативного робота	183
<i>Владыкина П. О.</i> Исследование процессов управления двигателями мультикоптера в режимах взлета и посадки	187

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

<i>Кукишев Д. Ю., Мещеряков В. Н.</i> Поисковый алгоритм в энергосберегающем электроприводе на примере скалярной системы управления	193
<i>Глуценко А. И.</i> Применение нейросетевого настройщика для адаптации параметров регулятора скорости SIEMENS SINAMICS DCM при управлении двигателем постоянного тока	197
<i>Рассадин Ю. М.</i> Задача стабилизации маятника при ограничении на управляющий момент вращения	202
<i>Донских И. Н., Кискин Е. А., Заводчиков М. А., Стрельцов А. А.</i> Инновационная энергетика и перспективные технологии энергосбережения	205
<i>Елизаров И. А., Василевский К. С., Иржавцев К. Ю., Толстошеин С. С.</i> Беспроводные технологии в системе мониторинга параметров хранения зерновых культур	209
<i>Беляев Н. Г., Елизаров И. А., Назаров В. Н., Третьяков А. А.</i> Автоматизированный испытательный комплекс «Умный сад»	213
<i>Заводчиков М. А., Кискин Е. А., Алексеев В. В., Емельянов Е. В.</i> Подход к построению автоматизированных систем управления энергообеспечением критически важных объектов на основе микропроцессорных средств	218

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ БОРЬБА

<i>Баранов Д. А., Долбин Р. А., Немченко С. И., Разнополов А. С.</i> Информационно-аналитическая система для управления и планирования боевого применения частей и подразделений РЭБ	223
<i>Алферов Ю. В., Мартиросов С. А., Семенюк А. В., Шнайдер А. А.</i> Построение и реализация блока управления генератора хаотических колебаний для постановки помех	227
<i>Алферов Ю. В., Мартиросов С. А., Семенюк А. В., Шнайдер А. А.</i> Моделирование хаотических колебаний для блокирования каналов управления беспилотными летательными аппаратами	230
<i>Алферов Ю. В., Мартиросов С. А., Семенюк А. В., Шнайдер А. А.</i> Информационно-аналитическая система построения помех для блокирования каналов управления робототехническими комплексами	235
<i>Тхоренко М. Ю., Гаракоев А. М.</i> Модель вторичного электромагнитного поля в системах аэроэлектроразведки с учетом конечности размеров источника	239
<i>Тхоренко М. Ю., Мойланен Е. В., Гаракоев А. М.</i> Анализ работы аэроэлектроразведочных систем с различной геометрией на материалах геофизических съемок в зоне центрально-африканского разлома	244
<i>Коньков С. И.</i> Определение удельного электрического сопротивления для модели однородного полупространства	249
<i>Дроков Р. А., Карманов С. В., Назаров В. Н., Елизаров И. А.</i> Беспроводные технологии в животноводстве	256
<i>Гаракоев А. М., Тхоренко М. Ю.</i> Алгоритм управления летательным аппаратом при выполнении аэрогеофизической съемки	258

Секция III. УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ, СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ И БИОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УПРАВЛЕНИЕ В ОБРАЗОВАНИИ

<i>Немченко С. И., Долбин Р. А., Разнополов А. С., Баранов Д. А.</i> Информационно-аналитическая система для подготовки специалистов станций помех и пунктов управления	262
<i>Корепанов В. О.</i> Модели стратегической рефлексии для задачи формирования команды	265
<i>Шишкин А. А., Меркушова К. А.</i> Перспективы применения и развития моделей построения индивидуальной траектории освоения оператором эрготехнической системы	270

УПРАВЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

<i>Болдышев Б. А.</i> Дискретный подход к моделированию простых нервных систем	274
<i>Коробов А. А., Фролов С. В., Алиев Н. Э.</i> Моделирование регуляции системы кровообращения человека	278

УПРАВЛЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

<i>Половинкина А. И., Лесных Н. Ю.</i> Проблематика развития производства и экономики в рамках реализации концепции устойчивого развития	282
<i>Михеев И. Е.</i> Задача о диверсификации рубля по двум вкладам в кооперативной постановке	287
<i>Федянин Д. Н.</i> Модель социального обучения умных датчиков	291
<i>Бекирова О. Н., Трифонова М. С., Rogozina E. A.</i> Влияние системы оценки качества на конкурентоспособность объектов жилой недвижимости	297
<i>Аверина Т. А., Брежнева З. О.</i> Механизм обратных приоритетов для решения ресурсных задач в строительстве	303
<i>Зобненко А. В.</i> Основные задачи взаимодействия со стейкхолдерами проекта	308
<i>Баркалов С. А., Курочка П. Н., Первалова О. С.</i> История проектного управления в России	314
<i>Строганова Я. С., Волкова А. А.</i> Сбалансированная система показателей как процесс представления стратегии в строительной организации	318
<i>Базенков Н. И., Сандомирская М. С.</i> Исследование дисперсии цен в интернет-торговле: модели ограниченной рациональности	322
<i>Ходунов А. М., Калинина Н. Ю., Корнева Н. А.</i> Оценка эффективности команды молодежных проектов на примере проектной деятельности студентов	327
<i>Меньщикова В. И., Андреева И. А.</i> Управление сложными социально-экономическими системами в условиях цифровизации производства	332
<i>Меркулова Е. Ю., Авдюшин В. В.</i> Управление экономической безопасностью социально-экономической системы региона	336
<i>Петров И. В.</i> О свойствах равновесных конфигураций в играх формирования сетей	342

Секция IV. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

<i>Балабанов П. В., Егоров А. С., Дивин А. Г., Жиркова А. А., Мищенко С. В.</i> Гиперспектральный контроль пищевых продуктов	345
<i>Балабанов П. В., Дивин А. Г., Егоров А. С., Дон-Юни Нсено-немби.</i> Система технического зрения для контроля качества овощей и фруктов	351
<i>Баранов Д. А., Сурков М. А., Лахно Г. А.</i> Информационно-аналитическая система для подготовки специалистов радиоразведки, РЭБ и автоматизированных пунктов управления	355
<i>Голуб А. С., Ильичев Н. С.</i> Информационные технологии управления устройством обнаружения сигналов стандарта DMR	360
<i>Разнополов А. С., Долбин Р. А., Немченко С. И., Баранов Д. А.</i> Алгоритм поиска и анализа радиосигналов в каналах управления БПЛА противника	364
<i>Полякова Т. М., Савенков А. П., Чечетов К. Е.</i> Простые алгоритмы детектирования и определения размеров объектов на контрастных изображениях	368
<i>Найденов А. А., Сысоев А. С.</i> Разработка системы детектирования автотранспортных происшествий на основе данных видеофиксации и методов машинного обучения	373
<i>Лакомов Д. В., Маамари Г. Аль.</i> Информационная технология обработки графических изображений при управлении системами жизнеобеспечения города	378

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ

<i>Ищук И. Н., Глинчиков С. Н., Тельных Б. К., Громов Ю. Ю.</i> Устройства технического контроля силовых конструкций из композиционных материалов беспилотных летательных аппаратов	383
<i>Ищук И. Н., Глинчиков С. Н., Лихачев М. А., Тяпкин В. Н.</i> Расчет теплофизических параметров по термограммам поверхности силовых конструкций из композиционных материалов	388
<i>Шихвердиева А. Ш., Максимова Е. А.</i> Управление эксплуатацией объектов критической информационной инфраструктуры	392
<i>Цветков С. О., Алексеев В. В., Худяков А. П., Емельянов Е. В.</i> Анализ подходов к повышению эффективности применения технических систем в условиях воздействий негативных факторов	397
<i>Уланов А. О., Маджед Х. Л. М.</i> Подходы к оценке надежности информационных систем	402
<i>Рязанов И. Г., Грибков А. Н.</i> Применение нейросетевых технологий в задачах определения оптимального периода технического обслуживания информационно-измерительных и управляющих систем	408

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Уланов А. О., Маджед Х. Л. М.</i> Угрозы безопасности информационных систем, мероприятия по предотвращению	413
<i>Широкий А. А., Финьков В. Н.</i> Оценка рисков охраняемым объектам и управление охраняемыми мерами на основе байесовской стратегии	417

<i>Алферов Ю. В., Мартиросов С. А., Семенюк А. В., Шнайдер А. А.</i> Использование программного комплекса «БАСТИОН» для управления информационной безопасностью сетевой информационной системы	423
<i>Алферов Ю. В., Мартиросов С. А., Семенюк А. В., Шнайдер А. А.</i> Управление информационной безопасностью радиоэлектронного объекта путем сканирования уязвимостей устройств с помощью программного комплекса «БАСТИОН»	427
<i>Донских И. Н., Кастерин Д. А., Кискин Е. А., Стрельцов А. А.</i> Анализ правовых аспектов построения системы защиты информации в организации	432

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ

<i>Маркович Л. А.</i> Параллельный алгоритм MARS для решения задачи нахождения максимального разреза в графе	435
<i>Рыжов М. С.</i> Статистический анализ структуры случайного графа по экстремальным свойствам влиятельности узлов	440
<i>Елфимова Д. А.</i> Построение математических моделей износа валков с использованием методов сжатия	445
<i>Федутинов К. А.</i> Модификация нейронной сети FUZZY ARTMAP в условиях пересекающихся классов	449
<i>Поляков Д. В.</i> Построение интеллектуальных информационных систем семантического анализа текстовой информации на основе нечетких коллокаций	454
<i>Минин Ю. В.</i> Методы и модели разработки и анализа информационных систем	458
<i>Диане С. А. К., Лесив Е. А.</i> Автоматический синтез обучающих множеств в задачах нейросетевого анализа изображений	461

Секция I

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ

А. А. Горинов

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

НАХОЖДЕНИЕ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНОМЕРНЫХ ДИНАМИК

Аннотация. Представлен метод построения конечномерных динамик для систем нелинейных эволюционных дифференциальных уравнений. Этот метод позволяет находить точные и приближенные решения эволюционных систем и исследовать их на асимптотическую устойчивость.

A. A. Gorinov

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia)

FINDING SOLUTIONS FOR SYSTEMS OF EVOLUTIONAL DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH THE METHOD OF FINITE DIMENSIONAL DYNAMICS

Abstract. Method of constructing finite dimensional dynamics for the systems of nonlinear differential equations is proposed in the paper. This method allows to find exact and approximate solutions for systems of evolutionary equations and to investigate its asymptotic stability.

1. ВВЕДЕНИЕ

В задаче рассматривались системы из n эволюционных дифференциальных уравнений с пространственными производными до порядка l включительно:

$$U_t = \Phi \left(x, U, U_x, \dots, \frac{\partial^l U}{\partial x^l} \right). \quad (1)$$

Здесь U и Φ – вектор-функции размерности n :

$$U = (u^1, u^2, \dots, u^n) \quad \text{и} \quad u^i = u^i(t, x), \quad \Phi = (\phi^1, \phi^2, \dots, \phi^3).$$

2. КОНЕЧНОМЕРНЫЕ ДИНАМИКИ

2.1. Определение конечномерных динамик

Система обыкновенных дифференциальных уравнений задает гиперповерхность в некотором пространстве. Векторные поля, переводящие эту гиперповерхность саму в себя, называются инфинитезимальными симметриями. Более того, если эти поля сдвигают гиперповерхность не вдоль решений исходной системы уравнений, то они называются тасующими симметриями. **Тасующие симметрии** могут переводить одно решение системы в другое.

Введем систему уравнений $F(x, y, y', y'', \dots)$ с производными до порядка k включительно. F – вектор-функция, а y – вектор размерности n , определяемый как $y^i = u^i(t, x)$ с «замороженной» независимой координатой t .

В канонических координатах x, y_0^1, \dots, y_k^n на пространстве k -джетов $J^k(1, n)$ эту систему можно переписать в следующем виде:

$$F(x, y_0, y_1, \dots, y_k). \quad (2)$$

Определение 1. [1] Система уравнений $F(x, y_0, y_1, \dots, y_k)$ называется **конечномерной динамикой** для системы эволюционных уравнений (1), если вектор-функция $\Phi(x, y_0, y_1, \dots, y_l)$ является **производящей функцией симметрий** системы $F(x, y_0, y_1, \dots, y_k)$.

2.2. Поиск динамик

Система дифференциальных уравнений (2) задает гиперповерхность в пространстве джетов:

$$\varepsilon = \{F(x, y_0, y_1, \dots, y_k) = 0\} \subset J^k(1, n). \quad (3)$$

Теорема 1. Система обыкновенных дифференциальных уравнений (3) является **конечномерной динамикой** для системы эволюционных уравнений (1), тогда и только тогда, когда

$$\sum_{i=0}^k \frac{\partial F}{\partial y_i} D^i(\Phi) = 0 \text{ mod } DF, \quad (4)$$

где D – оператор полного дифференцирования и DF – дифференциальный идеал алгебры функций на пространстве джетов, порожденный функцией F .

Для двух вектор-функций G и H на пространстве k -джетов $J^k(1, n)$ введем **скобку Пуассона** [2]:

$$[G, H] = \sum_{i=0}^k \left(\frac{\partial G}{\partial y_i} D^i(H) - \frac{\partial H}{\partial y_i} D^i(G) \right). \quad (5)$$

Теорема 2. [3] Система обыкновенных дифференциальных уравнений (3) является *конечномерной динамикой* для системы эволюционных уравнений (1), тогда и только тогда, когда

$$[\Phi, F] = \sum_{i=0}^{l-1} b_i D^i(F), \quad (6)$$

где b_i – матрица $n \times n$, состоящая из коэффициент-функций на пространстве джетов.

Легко увидеть, что левая часть уравнения (4) записана в пространстве $J^{k+l}(1, n)$, а левая часть уравнения (6) в пространстве $J^{k+l-1}(1, n)$, так как слагаемые, содержащие джеты наивысшего порядка $J^{k+l}(1, n)$, согласно (5) равны $\frac{\partial \Phi}{\partial y_l} D^l(F) = \frac{\partial \Phi}{\partial y_l} y_{k+l} \frac{\partial F}{\partial y_k} + \dots$ и $\frac{\partial F}{\partial y_k} D^k(\Phi) = \frac{\partial F}{\partial y_k} y_{l+k} \frac{\partial \Phi}{\partial y_l} + \dots$, что в сумме дает 0. Так как для вычислений легче пользоваться более низкими порядками систем, в дальнейших расчетах будем пользоваться теоремой 2 и формулой (6).

3. ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЙ

3.1. Тасующие симметрии

Для нахождения решений системы эволюционных уравнений (1) необходимо построить тасующие симметрии для уравнения (2) с **производящей функцией** $\Phi(x, y_0, y_1, \dots, y_l)$ [3].

Введем формы Картана на пространстве бесконечных джетов $J^\infty(1, n)$ для любого i :

$$\Omega_i = dy_{i-1} - dy_i dx,$$

где $\Omega_i = (\omega_i^1, \omega_i^2, \dots, \omega_i^n)$.

Так же введем оператор полного дифференцирования D на $J^\infty(1, n)$, обращающий формы Картана в ноль $\Omega_i(D) = 0$ для любого i :

$$D = \frac{\partial}{\partial x} + \sum_{i=0}^{\infty} y_{i+1} \frac{\partial}{\partial y_i}.$$

Тогда **тасующие симметрии** для системы уравнений (2) будем искать в виде

$$S = \sum_{i=0}^k a_i \frac{\partial}{\partial y_i}, \quad (7)$$

где a_i – вектор, состоящий из функций коэффициентов на $J^k(1, n)$. Стоит заметить, что a_0 называется **производящей функцией** тасующих симметрий.

Производные L и дифференциальной формы Ω_i вдоль векторного поля S определяются следующим соотношением:

$$L_S(\Omega_i) = S \lrcorner d\Omega_i + d(S \lrcorner \Omega_i).$$

Стоит заметить, что $S \lrcorner \Omega_i = \Omega_i(S) = a_{i-1}$. Так же $d\Omega_i = -dy_i \wedge dx$, и как следствие, $S \lrcorner d\Omega_i = -a_i dx$. Таким образом,

$$L_S(\Omega_i) = da_{i-1} - a_i dx. \quad (8)$$

По определению векторное поле S является **тасующей симметрией** уравнения (2), если

$$L_S(\omega_i^j) = \sum_{r=1}^{\infty} b_{j,r} \Omega_r + B_j dF. \quad (9)$$

Здесь $b_{j,r}$ и B_j – некоторые вектор-функции на $J^k(1, n)$.

Запишем полный дифференциал от произвольной вектор-функции $\mathbf{g} \in C^\infty(J^k(1, n))$:

$$\begin{aligned} d\mathbf{g} &= \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial x} dx + \sum_{i=0}^k \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y_i} dy_i = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial x} dx + \sum_{i=0}^k \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y_i} (\Omega_{i+1} + y_{i+1} dx) = \\ &= \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial x} + \sum_{i=0}^k \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y_i} y_{i+1} \right) dx + \sum_{i=0}^k \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y_i} \Omega_{i+1} = D(\mathbf{g}) dx + \sum_{i=0}^k \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y_i} \Omega_{i+1}. \end{aligned}$$

Пользуясь полученным результатом, а также уравнениями (8) и (9), получим:

$$L_S(\Omega_i) = D(a_{i-1}) dx + \sum_{i=0}^k \frac{\partial a_{i-1}}{\partial y_i} (\Omega_{i+1} - a_i dx) = \mathbf{B} \left(D(F) + \sum_{i=0}^k \frac{\partial F}{\partial y_i} \Omega_{i+1} \right) + \sum_{r=1}^{\infty} b_r \Omega_r.$$

Так как мы можем выбрать произвольный b_r на $J^k(1, n)$, выберем его таким, чтобы $b_{i+1} = \frac{\partial a_{i-1}}{\partial y_i} - \frac{\partial F}{\partial y_i}$. В этом случае равенство выше примет следующий вид:

$$(D(a_{i-1}) - a_i - \mathbf{B}D(F)) dx = 0.$$

Вспомним, что a_i является функцией на пространстве $J^k(1, n)$, а оператор D повышает порядок пространства джетов, получим, что коэффициент при джетах порядка $k+1$ должен быть равен нулю:

$$\frac{\partial a_{i-1}}{\partial y_k} - \mathbf{B} \frac{\partial F}{\partial y_k} = 0.$$

Отсюда получаем $\mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{a}_{i-1}}{\partial \mathbf{y}_k} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{y}_k} \right)^{-1}$.

Теорема 3. Инфинитезимальные *тасующие симметрии* для системы уравнений $F(x, y_0, y_1, \dots, y_k)$ с производящей функцией $\Phi(x, y_0, y_1, \dots, y_l)$ могут быть записаны в форме, $S = \sum_{i=0}^k \mathbf{a}_i \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}_i}$, где вектор-функции \mathbf{a}_i рассчитываются по рекуррентной формуле

$$\mathbf{a}_i = D(\mathbf{a}_{i-1}) - \frac{\partial \mathbf{a}_{i-1}}{\partial \mathbf{y}_k} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{y}_k} \right)^{-1} D(\mathbf{F}). \quad (10)$$

3.2. Точные решения

Для нахождения точных решений системы (1), воспользовавшись теоремой 2, выберем конечномерную динамику $F(x, y_0, y_1, \dots, y_k)$.

Для выбранной динамики, согласно теореме 3, строим поле тасующих симметрий (7). Для этого поля находим однопараметрическую группу диффеоморфизмов тасующих симметрий по параметру t . Это позволяет нам выбирать координаты $(x_0, y_0(t))$, причем для каждого значения параметра t выбирается решение системы $F(x, y_0, y_1, \dots, y_k)$, проходящее через задаваемую этим параметром точку (x_0, y_0) .

Таким образом, в каждой точке с координатами x, t задано решение системы (1), проходящее через точку x_0, t_0, U_0 .

Список использованных источников

1. Kruglikov, B. S. Finite dimensional dynamics for Kolmogorov–Petrovsky–Piskunov equation / B. S. Kruglikov, O. V. Lychagina // *Lobachevskii J. – Math.*, 2005. – V. 19. – P. 13 – 28.
2. Ахметзянов, А. В. Attractors in models of porous media flow / А. В. Ахметзянов, А. Г. Кушнер, В. В. Лычагин // *Doklady Mathematics*. – Amsterdam : Pleiades Publishing, Ltd. – 2017. – V. 95, No. 1. – P. 72 – 75.
3. Горинов, А. А. Конечномерные динамики для систем эволюционных дифференциальных уравнений / А. А. Горинов // *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018)* : матер. Одиннадцатой междунар. конф. – М. : ИПУ РАН, 2018. – Т. 1. – С. 350.
4. Kushner, A. G. Contact geometry and nonlinear differential equations / A. G. Kushner, V. V. Lychagin., V. N. Rubtsov // *Encyclopedia Math. Its Appl.*, 101. – Cambridge : Cambridge University Press.

С. С. Мухина¹, А. Г. Кушнер²

(¹МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия,

²Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия)

**МНОГОЗНАЧНЫЕ И РАЗРЫВНЫЕ РЕШЕНИЯ КВАЗИЛИНЕЙНЫХ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА
И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ**

Аннотация. Представлен численный метод построения многозначных и разрывных решений эволюционных квазилинейных дифференциальных уравнений с двумя независимыми переменными. Для таких уравнений рассматривается задача Коши. В качестве примера приводятся задачи нелинейной фильтрации и возникновения автомобильных пробок.

S. S. Mukhina¹, A. G. Kushner²

(¹BMSTU, Moscow, Russia,

²V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia)

**MULTIVALUED AND DISCONTINUOUS SOLUTIONS
OF FIRST ORDER QUASILINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS
AND CONTROL PROBLEMS IN CONTINUOUS MEDIA**

Abstract. The talk is devoted numerical method for constructing multivalued and discontinuous solutions of evolutionary quasilinear differential equations with two independent variables. For such equations, the Cauchy problem is considered. As an example, the problems of nonlinear filtration and the occurrence of traffic jams are given.

Введение. Многие модельные задачи теории сплошных сред описываются квазилинейными дифференциальными уравнениями в частных производных вида

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{d}{dx} F(u) = 0. \quad (1)$$

Здесь $u = u(t, x)$ – неизвестная функция времени t и пространственной переменной x ; $F(u)$ – дифференцируемая функция; $\frac{d}{dx}$ – оператор полного дифференцирования по переменной x .

Такие уравнения представляют собой дифференциальную форму законов сохранения. Примером уравнения вида (1) является уравнение Эйлера

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

представляющее собой частный случай уравнения Навье–Стокса для одномерного движения газа или жидкости без учета вязкости.

Как известно, типичной особенностью таких уравнений является так называемое «разрушение» решений: задача Коши имеет классические решения только для малых значений переменной t . Эта особенность приводит к необходимости рассматривать разрывные решения.

В данной работе используется определение разрывных решений, основанное на геометрической теории нелинейных дифференциальных уравнений [1] и теории многозначных решений. Этот подход позволяет проследить эволюцию фронтов ударных волн, отвечающих разрывным решениям уравнения (1). На его основе составлена компьютерная программа, для расчета распространения ударных волн, что позволяет в какой-то степени управлять ими. Приводятся примеры расчета решений задачи Коши для уравнений нелинейной фильтрации автомобильного потока на трассе.

Многозначные решения. Уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + F'(u) \frac{\partial u}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Ему отвечает гиперповерхность

$$E = \{u_t + F'(u)u_x = 0\}$$

в пространстве 1-джетов с координатами t, x, u, u_t, u_x [4].

Многозначное решение дифференциального уравнения первого порядка с двумя независимыми переменными – это двумерное подмногообразие многообразия E , на котором форма Картана

$$\omega = du - u_t dt - u_x dx$$

обращается в нуль.

В отличие от классического решения, проекция многозначного решения на пространство независимых переменных может иметь геометрические особенности – каустики (на рис. 1 каустика – это кривая на плоскости t, x). При удалении из графика многозначного решения точек каустики он распадется на куски, каждый из которых является графиком классического решения. Поэтому многозначные решения можно использовать для построения разрывных решений.

Покажем, как можно получить многозначные решения для уравнений (1). Рассмотрим задачу Коши

$$u|_{t=0} = U(x),$$

где $U(x)$ – заданная дифференцируемая функция. В трехмерном пространстве 0-джетов данные Коши определяют кривую $L = \{t = 0, u = U(x)\}$. Траектории векторного поля

$$X = \frac{\partial}{\partial t} + F'(u) \frac{\partial}{\partial x}$$

являются характеристиками уравнения (1). Пусть φ_S – преобразование сдвига вдоль траекторий этого векторного поля. Тогда поверхность $\mathcal{L} = \varphi_S(L)$ является проекцией многозначного решения уравнения (1) на пространство 0-джетов [1, 2]. Это наблюдение позволяет создать численный метод для построения многозначных решений задачи Коши.

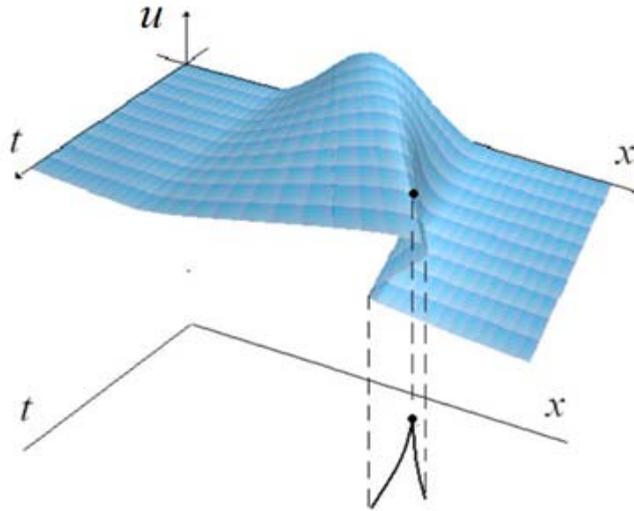


Рис. 1. Пример многозначного решения и каустики для уравнения (1) при $F(u) = \frac{u^2}{2}$

Разрывные решения. Для построения разрывных решений используются законы сохранения [2, 6].

Законом сохранения дифференциального уравнения с двумя независимыми переменными t, x называется горизонтальная дифференциальная 1-форма на пространстве джетов (т.е. форма вида $\theta = A dt + B dx$), внешний дифференциал которой обращается в нуль на каждом решении уравнения [6]. Здесь A, B – функции на пространстве джетов.

Уравнение (1) имеет закон сохранения

$$\theta = u dx + F dt.$$

Кривая, по которой происходит разрыв многозначного решения, определяется исходя из правила Гюгонио–Ренкина: значения дифференциальной формы θ на линиях разрыва, лежащих на поверхности \mathcal{L} , должны совпадать [6]. Это правило позволяет получить разрывное решение уравнения (1).

Определение кривой разрыва сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения

$$\frac{dx}{dt} = \frac{F(u_+) - F(u_-)}{u_+ - u_-}.$$

Модель Бакли–Левретта одномерной фильтрации. Описанный алгоритм применен к расчету движения фронта вытеснения нефти водой в модели одномерной фильтрации.

При разработке нефтяных месторождений поддержание энергии нефтяного пласта обеспечивается закачкой под давлением вытесняющей жидкости (воды, горячей воды или водных растворов активных реагентов) в нагнетательные скважины, что обеспечивает уменьшение вязкости нефти и способствует повышению нефтеотдачи. При этом перепад давления между забоями нагнетательных и добывающих скважин приводит к возникновению фильтрационных потоков.

Одной из классических моделей одномерной двухфазной фильтрации в пористой среде является модель Бакли–Левретта [5]. Она описывается дифференциальным уравнением (1).

В этой модели переменная x означает координату на прямой, вдоль которой происходит фильтрация, а функция F – это функция Бакли–Левретта, определяемая физическими параметрами пористой среды и флюидов. Переменная u отвечает водонасыщенности (объемной доли воды).

На рисунке 2 представлена каустика и линия разрыва для многозначного решения уравнения Бакли–Левретта.

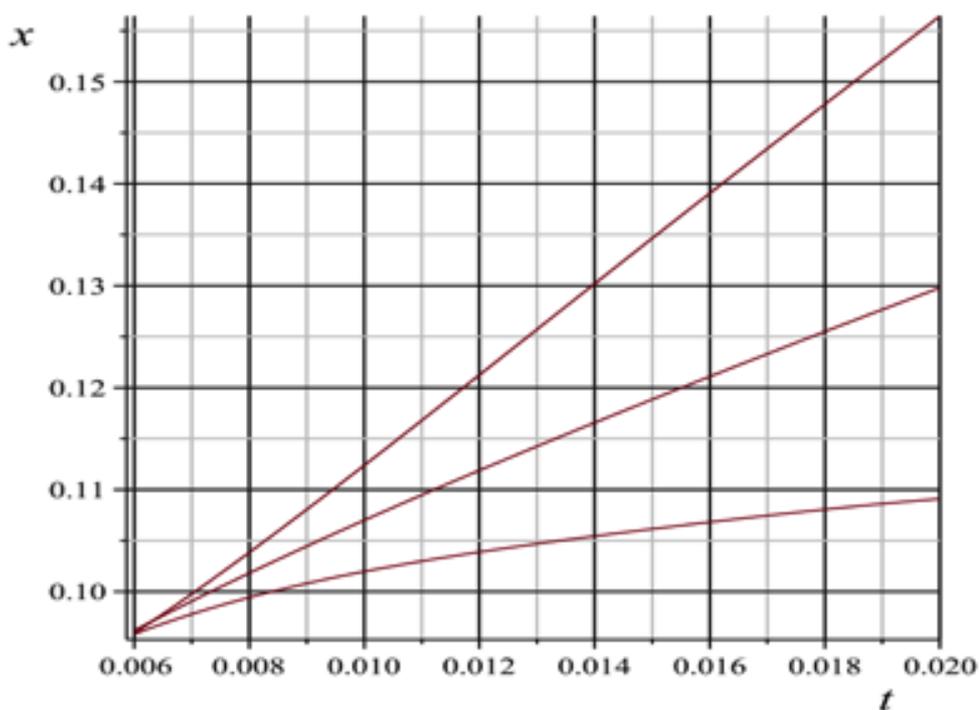


Рис. 2. Каустика и линия разрыва многозначного решения уравнения Бакли–Левретта

Приведенный метод позволяет управлять скоростью распространения фронта вытеснения нефти водой, изменяя давление на нагнетательной скважине [3].

Модель однополосного транспортного потока. Уравнение (1) описывает также модель Лайтхилла–Уизема однополосного транспортного потока [7, 8]. В этой модели автомобильный поток рассматривается как поток одномерной сжимаемой жидкости. В этой модели предполагается, что существует взаимно-однозначная зависимость, выраженная уравнением состояния, между скоростью и плотностью $u(t, x)$ потока и, кроме того, выполняется закон сохранения массы (количества автомобилей). Функция F обладает следующими свойствами: $F(u) = 0$ и $F''(u) < 0$. Последнее неравенство означает, что движение по двум одинаковым и независимым полосам с разными плотностями менее эффективно, чем движение по этим полосам с одинаковой плотностью. Для этой модели также характерно возникновение ударных волн, которые отвечают возникновению автомобильных пробок.

Заключение. В докладе показана возможность применения методов геометрической теории дифференциальных уравнений к исследованию проблем управления потоками (фильтрационными и автомобильными) в сплошных средах. Разработанная компьютерная программа позволяет рассчитать эволюцию ударных волн.

Список использованных источников

1. Ахметзянов, А. В. Математические модели управления разработкой нефтяных месторождений / А. В. Ахметзянов, А. Г. Кушнер, В. В. Лычагин. – М. : ИПУ РАН, 2017. – С. 124.
2. Ахметзянов, А. В. Геометрическая теория особых режимов в системах управления с распределенными параметрами / А. В. Ахметзянов, А. Г. Кушнер, В. В. Лычагин // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 11. – С. 81 – 102.
3. Ахметзянов, А. В. Управление фронтом вытеснения в двухфазной модели фильтрации несмешивающихся жидкостей / А. В. Ахметзянов, А. Г. Кушнер, В. В. Лычагин // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 469, № 2. – С. 139 – 142.
4. Виноградов, А. М. Введение в геометрию нелинейных дифференциальных уравнений / А. М. Виноградов, И. С. Красильщик, В. В. Лычагин. – М. : Наука, 1986. – 336 с.
5. Buckley, S. E. Mechanism of fluid displacement in sands / S. E. Buckley, M. C. Leverett // Trans. AIME, SPE. – 1942. – V. 146. – P. 107 – 116.
6. Kushner, A. G. Contact geometry and nonlinear differential equations / A. G. Kushner, V. V. Lychagin, V. N. Rubtsov. – Encyclopedia Math. Its Appl., 101. Cambridge: Cambridge University Press. – 2007. – xxii+496 P.
7. Уизем, Дж. Линейные и нелинейные волны / Дж. Уизем. – М. : Мир, 1977.
8. Брайловский, Н. О. Моделирование транспортных систем / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. – М. : Транспорт, 1978 – 125 с.

С. Л. Блюмин, А. В. Галкин, Л. В. Левина, М. Н. Орешина
(Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия)

МАТРИЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТИЗИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. Представлены потенциально полезные матричные представления дискретизированных моделей распределенных систем управления энергосиловыми и тепловыми режимами в технологических процессах производства стали, описываемых дифференциальными уравнениями с частными производными.

S. L. Blyumin, A. V. Galkin, L. V. Levina, M. N. Oreshina
(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

MATRIX REPRESENTATIONS OF DISCRETIZED MODELS OF DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS

Abstract. Potentially useful matrix representations are presented for discretized models of distributed control systems for energy-power and thermal modes in technological processes of steel production described by partial differential equations.

Хорошо известно, что технологические процессы, как правило, являются распределенными и традиционно моделируются дифференциальными уравнениями с частными производными [1, 2], как и системы управления ими [3]. В то же время для современных целей цифрового управления такие модели должны быть дискретизованы [4]. Дискретизованная тем или иным численным методом модель распределенной системы управления может быть представлена в виде (t – время, p, q – пространственные переменные):

$$x[t; p, q] = Ax[t-1; p, q] + Bx[t-1; p-1, q] + Cx[t-1; p, q-1] + \\ + Dx[t-1; p+1, q] + Ex[t-1; p, q+1] + Fu[t; p, q],$$

где x – вектор состояния системы; u – вектор управляющего входного воздействия; A, \dots, F – матрицы подходящих размеров.

Эволюция такой дискретной пространственно-временной системы следует по шагам в соответствии с шаблоном

$$P = \{[0, 0], [-1, 0], [0, -1], [1, 0], [0, 1]\}$$

при условии, что задано начальное состояние $x[0; 0, 0]$, так что

$$P[0] = \{[0, 0]\}, P[1] = P, P[2] = P[P[1]], \dots, P[t] = P[P[t-1]].$$

Эволюция может быть моделирована последовательностью графов, представленных своими матрицами инцидентности.

Цель данной работы – показать, что эволюцию целесообразно ремоделировать последовательностью метаграфов, матрицы инцидентности которых более компактны и экономны для представления [5].

Метаграфы характеризуются тем, что наряду с исходным носителем – множеством вершин – в них фигурируют метавершины – гиперребра промежуточного между графом и метаграфом гиперграфа – не обязательно двухэлементные множества вершин; метадугами же метаграфа являются упорядоченные пары метавершин. Начала дуг орграфа и метадугметаграфа ниже представляются в матрице инцидентности числом -1 , а концы – числом 1 .

Во избежание загромождения изложения достижение поставленной выше цели показано на примере первых шагов эволюции.

Первый шаг (здесь и далее матрицы для удобства представлены таблицами).

0	0;	0,	0		-1	-1	-1	-1	-1
1	1;	0,	0		1				
2	1;	-1,	0			1			
3	1;	0,	-1				1		
4	1;	1,	0					1	
5	1;	0,	1						1

Здесь последние 5 столбцов – матрица инцидентности орграфа.

Ремоделирующая ее матрица инцидентности метаграфа имеет более компактный вид:

0	0;	0,	0		-1
1	1;	0,	0		1
2	1;	-1,	0		1
3	1;	0,	-1		1
4	1;	1,	0		1
5	1;	0,	1		1

Второй шаг (в таблице $2 + 18$ строк и $5 + 25$ столбцов, поэтому она разбита на 2 части).

					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	0		-1	-1	-1	-1	-1					

2	1	-1	0							-1	-1	-1	-1	-1
3	1	0	-1											
4	1	1	0											
5	1	0	1											
6	2	0	0		1					1				
7	2	-1	0			1					1			
8	2	0	-1				1							
9	2	1	0					1						
10	2	0	1						1					
11	2	-1	1									1		
12	2	-1	-1										1	
13	2	1	-1											
14	2	1	1											
15	2	-2	0											1
16	2	0	-2											
17	2	2	0											
18	2	0	2											

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
-1	-1	-1	-1	-1										
					-1	-1	-1	-1	-1					
										-1	-1	-1	-1	-1
1					1					1				
	1													
						1								
											1			
												1		
		1												
			1				1							

								1					1	
			1											
									1					
														1

Здесь последние 25 столбцов – матрица инцидентности орграфа.

Ниже представлена ремоделирующая ее матрица инцидентности метаграфа, которая имеет существенно более компактный вид: если на первом шаге 5 дуг орграфа заменились 1-й метадугой метаграфа, т.е. на $4 = 5 - 1$ меньше, то на втором шаге 25 дуг орграфа заменились 5-ю метадугами миметаграфа, т.е. на $20 = 25 - 5$ меньше. Этим подтверждается экономия, получаемая при ремоделировании орграфов метаграфами.

Матрица инцидентности метаграфа на втором шаге.

					1	2	3	4	5
1	1	0	0		-1				
2	1	-1	0			-1			
3	1	0	-1				-1		
4	1	1	0					-1	
5	1	0	1						-1
6	2	0	0		1	1	1	1	1
7	2	-1	0		1	1			
8	2	0	-1		1		1		
9	2	1	0		1			1	
10	2	0	1		1				1
11	2	-1	1			1			1
12	2	-1	-1			1	1		
13	2	1	-1				1	1	
14	2	1	1					1	1
15	2	-2	0			1			
16	2	0	-2				1		
17	2	2	0					1	
18	2	0	2						1

В заключение отметим, что наиболее простыми примерами дискретизированных моделей распределенных систем управления могут служить

$$x[p, q] = Ax[p-1, q] + Bx[p, q-1] + Cu[p, q],$$

$$x[p, q, r] = Ax[p-1, q, r] + Bx[p, q-1, r] + Cu[p, q, r-1].$$

Для них матрицы инцидентности метаграфов имеют очевидную структуру.

Вопросы применения рассмотренных матричных представлений при решении задач управления заслуживают отдельного изложения.

Таким образом, в данной работе на простом и наглядном примере показано, что эволюцию дискретизированной модели распределенной системы управления целесообразно ремоделировать последовательностью метаграфов, матрицы инцидентности которых более компактны и экономны для представления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта 19-48-480009-р_а.

Список использованных источников

1. Галкин, А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния сляба в УНРС / А. В. Галкин, Д. А. Филиппов, В. А. Пименов // Управление большими системами (УБС '2015). – М. : ИПУ РАН, 2015. – С. 600 – 611.

2. Галкин, А. В. Разработка математической модели процесса нагрева слябов в методических печах толкательного типа / А. В. Галкин, М. Ч. Татарникова // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2018. – Т. 3. – С. 67 – 71.

3. Некрасова, Д. А. Разработка алгоритма управления процессом выплавки стали / Д. А. Некрасова, А. В. Галкин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2018. – № 2. – С. 58 – 66.

4. Беляев, Д. Ю. Разработка программного обеспечения для моделирования энергосиловых и тепловых режимов на станах холодной прокатки / Д. Ю. Беляев, М. Н. Орешина // Современные сложные системы управления : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 15 – 19.

5. Блюмин, С. Л. Графоструктурное моделирование. Метаграфы и их матрицы / С. Л. Блюмин // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2015. – № 1. – С. 7 – 13.

С. А. Копылов, Ю. В. Минин

(Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия)

ЗАДАЧА СИНТЕЗА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С НЕЧЕТКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Аннотация. Представлена постановка задачи синтеза информационной системы с топологией «дерево–дерево», в которой ряд параметров являются нечеткими числами.

S. A. Kopylov, Yu. V. Minin

(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

THE PROBLEM OF SYNTHESIS OF INFORMATION SYSTEM WITH FUZZY PARAMETERS

Abstract. The statement of the problem of synthesis of an information system with a tree-tree topology in which a number of parameters are fuzzy numbers is presented.

В настоящее время происходит интенсивное развитие информационных процессов, протекающих во всех областях деятельности, что приводит к необходимости обработки и передачи больших объемов информации, а, следовательно, к значительному усложнению информационных систем (ИС) [1]. При разработке таких сложных систем, одним из вопросов является распределение элементов системы в ее структуре, обеспечивающее минимизацию затрат на синтез систем при надлежащем уровне ее функционирования [2 – 4]. Также необходимо отметить, что ряд значений параметров функционирования ИС сложно точно определить на этапе проектирования из-за влияния внешней среды. Это обуславливает применение аппарата теории вероятностей или аппарата нечетких множеств.

В работе [5] представлена постановка задачи размещения узлов в ИС с топологией «дерево–дерево» для случая, когда значения всех параметров известны и являются четкими числами. Далее сформулируем оптимизационную задачу, в ограничениях которой будут использоваться параметры с нечеткими значениями.

Требуется минимизировать стоимость синтеза ИС

$$\sum \sum C_{ij} X_{ij} - \sum \sum \sum C_{jkm} Y_{jkm} \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum X_{ij} = 1, \quad \forall i \in W, \quad (2)$$

$$\tilde{f}_{ijk} \leq \tilde{d} X_{jk}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in W, \quad \forall k \in W \cup \tilde{C}, \quad (3)$$

$$\sum \tilde{f}_{ijk} \leq (\tilde{K} - \tilde{d}) X_{jk}, \quad \forall j, k \in I, \quad (4)$$

$$\sum \tilde{f}_{ijk} \leq \tilde{K}X_{jk}, \quad \forall j \in I, \quad \forall k \in P \cup \tilde{C}, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \tilde{f}_{ijk} \leq \sum_{m \in R} \tilde{Q}_{jm}X_{jm}, \quad \forall j \in P, \quad k \in P \cup \tilde{C}, \quad (6)$$

$$\sum_{j \in W \cup C} \tilde{f}_{ikj} - \sum_{j \in W} \tilde{f}_{ijk} = \begin{cases} d, & \forall i, k \in I, k = i, \\ 0, & \forall k \neq i, k \in W \cup \tilde{C}, i \in I, \\ -d, & \forall i \in I, k = c, \end{cases} \quad (7)$$

$$X_{ij} \leq \sum_{k \in P \cup C} \sum_{m \in R} Y_{jkm}, \quad \forall j \in P, \quad \forall i \in I, \quad (8)$$

$$\sum_{k \in P \cup C} \sum_{m \in R} Y_{jkm} \leq 1, \quad \forall j \in P, \quad (9)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \quad X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если между узлами } i \text{ и } j \text{ есть связь,} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \\ \forall i \in W, \quad j \in W \cup \tilde{C}, \quad (10)$$

$$Y_{jkm} \in \{0, 1\}, \quad Y_{jkm} = \begin{cases} 1, & \text{если узел концентрации } j \text{ мощности } m \\ & \text{активен и соединен с узлом концентрации } k \\ & \text{связью мощности } m, \\ 0, & \text{в противном случае, } k \in P \cup \tilde{C}, m \in R, \\ & \forall j \in P, \end{cases} \quad (11)$$

$$\tilde{f}_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad j \in W, \quad k \in W \cup \tilde{C}, \quad (12)$$

где P – множество индексов, характеризующее расположения узлов, концентрирующих информационные потоки в СИС; I – множество индексов, характеризующее расположения конечных узлов СИС; W – множество индексов, где $W = I \cup P$; \tilde{C} – центральный узел СИС; \tilde{d} – трафик в каждом конечном узле; R – дискретное множество уровней мощностей, доступных для каждого узла концентрации; \tilde{Q}_{jm} – мощность каждого узла концентрации информационного потока на узле j на уровне m ; \tilde{K} – мощность соединения конечных узлов друг с другом; C_{ij} – стоимость соединения узла i с узлом j ; $C_{jk} = 0, \forall k \in P$ – стоимость соединения узла концентрации СИС с любым конечным узлом или центральным узлом; C_{jkm} – стоимость открытия узла концентрации j емкости m и соединения его с узлом k ; \tilde{f}_{ijk} – поток, идущий из конечного узла i по связи $(j, k), i \in I, j \in W, k \in W \cup C$; $X_{ij} = 1$, если связь существует между узлами i и $j, i \in W, j \in W$; в противном случае $X_{ij} = 0$; $Y_{jkm} = 1$, если узел концентрации j мощности m открыт и соединен узлом концентрации k связью мощности m , в противном случае $Y_{jkm} = 0$.

Целевая функция (1) минимизирует затраты на соединение конечных узлов друг с другом или с узлом концентрации информационных потоков в СИС, а также направляет информационные потоки от узлов концентрации с центральным узлом СИС. Ограничение (2) выделяет только одну исходящую дугу для каждого узла. Набор ограничений (3) подтверждает, что поток между двумя узлами существует – имеется в наличии связь. Ограничения (4) – (6) непосредственно касаются мощности. Сохранение потока обеспечивает ограничение (7). Ограничение (8) подтверждает, что узел концентрации открыт, если для него существуют исходящие дуги. Ограничение (9) допускает возможность установки только одного узла концентрации с некоторой производительностью m на каждом участке СИС. Наборы ограничений (10) – (12) обеспечивают целостность и неотрицательность переменных.

Значения следующих переменных являются нечеткими: \tilde{f}_{ij} с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{f}}$; \tilde{d} с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{d}}$; \tilde{Q} с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{Q}}$; \tilde{K} с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{K}}$.

Решение поставленной задачи для ее предельного случая, когда $\mu_{\tilde{f}} = 1$, $\mu_{\tilde{d}} = 1$, $\mu_{\tilde{Q}} = 1$, $\mu_{\tilde{K}} = 1$, соответствует полученным ранее результатам решения задачи синтеза при условии использования четких параметров [6].

Список использованных источников

1. Синтез и анализ живучести сетевых систем / Ю. Ю. Громов, В. О. Драчев, К. А. Набатов, О. Г. Иванова. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 150 с.
2. Задача распределения ресурсов в сетевой информационной системе / В. Е. Дидрих, И. В. Дидрих, Ю. Ю. Громов, М. А. Ивановский // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 541 – 549.
3. К вопросу о моделировании процесса распределения ресурсов в информационных системах / К. А. Набатов, Ю. В. Минин, С. Н. Коршиков, Х. Д. Лыонг // Информация и безопасность. – 2012. – Т. 15, № 4. – С. 461 – 470.
4. Ауад, М. Модель распределения ресурсов в сетевых информационных структурах / М. Ауад, Ю. В. Минин, Ю. Ю. Громов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2013. – № 4. – С. 215 – 220.
5. Определение параметров структуры сетевой информационной системы с многопунктовыми линиями связи / М. Ауад, Н. А. Овчинников, А. С. Моисеев и др. // Современные информационные технологии. – 2014. – № 19. – С. 19 – 23.
6. Размещение узлов сетевой информационной системы с топологией «дерево» / Ю. В. Минин, А. И. Елисеев, Б. М. Г. Саид, Е. Н. Минина // Информация и безопасность. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 131 – 134.

С. А. Копылов, Ю. В. Минин

(Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия)

ЗАДАЧА СИНТЕЗА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С КОМБИНАТОРНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Аннотация. Представлена постановка оптимизационной задачи синтеза информационной системы с комбинаторной топологией, в которой ряд параметров ограничений являются нечеткими числами.

S. A. Kopylov, Yu. V. Minin

(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

PROBLEM OF SYNTHESIS OF INFORMATION SYSTEM WITH COMBINATOR TOPOLOGY UNDER UNCERTAINTY

Abstract. The statement of the optimization problem for the synthesis of an information system with combinatorial topology is presented, in which a number of constraint parameters are fuzzy numbers.

Современное общество неразрывно связано с интенсивным развитием информационных процессов, протекающих во всех областях деятельности, что приводит к необходимости обработки и передачи больших объемов информации, а, следовательно, к значительному усложнению информационных систем (ИС).

В связи с этим особое значение приобретают вопросы организации и оптимизации функционирования ИС [1, 2]. Повышение качества функционирования влечет за собой значительное увеличение стоимости синтеза ИС. Это приводит к необходимости постановки и решения задачи синтеза ИС, решение которой позволит определить оптимальную взаимосвязь ее элементов.

В работах [3, 4] сформулированы постановки задач при условиях, когда все переменные являются четкими. Однако следует учесть, что достаточно часто задачу размещения узлов приходится решать в условиях неопределенности. Это обуславливает необходимость модернизации ранее сформулированных оптимизационных задач и их решения с учетом использования в них нечетких значений переменных.

Сформулируем основные допущения, используемые при постановке задачи синтеза ИС, представленной в данной работе.

В качестве используемой топологии ИС рассмотрим структуру связей элементов ИС в виде «звезда–дерево» [5]. ИС характеризуется наличием узлов

концентрации информационных потоков и связей между ними и центральным узлом, которые обладают одинаковыми параметрами.

Оптимизационная задача представлена следующим образом: необходимо минимизировать стоимость соединения конечных узлов ИС друг с другом или с узлом концентрации информационных потоков

$$\sum \sum C_{ij} X_{ij} + \sum C_j Y_j \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum X_{ij} = 1, \quad \forall i \in W, \quad (2)$$

$$\tilde{f}_{ijk} \leq \tilde{d} X_{jk}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in W, \quad \forall k \in W \cup \tilde{C}, \quad (3)$$

$$\sum \tilde{f}_{ijk} \leq (\tilde{K} - \tilde{d}) X_{jk}, \quad \forall j, k \in I, \quad (4)$$

$$\sum \tilde{f}_{ijk} \leq \tilde{K} X_{jk}, \quad \forall j \in I, \quad \forall k \in P \cup \tilde{C}, \quad (5)$$

$$\sum \tilde{f}_{ijc} \leq \tilde{Q} Y_j, \quad j \in P, \quad c - \text{центральный узел}, \quad (6)$$

$$\sum \tilde{f}_{ijc} - \sum \tilde{f}_{ijk} = 0, \quad \forall i \in I, \quad (7)$$

$$\sum \tilde{f}_{ikj} - \sum \tilde{f}_{ijk} = 0, \quad \forall k \neq i, j, k \in I, i \in I \quad (8)$$

$$\tilde{f}_{ikc} - \sum \tilde{f}_{ijk} = 0, \quad \forall i \in I, \quad \tilde{k} \in P, \quad c - \text{центральный узел}, \quad (9)$$

$$\sum \tilde{f}_{ijc} = d, \quad \forall i \in I, \quad c - \text{центральный узел}, \quad (10)$$

$$X_{il} \leq Y_l, \quad \forall l \in P, \quad \forall i \in I, \quad (11)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in W, \quad j \in W \cup \tilde{C}, \quad (12)$$

$$Y_j \in \{0, 1\}, \quad Y_j = \begin{cases} 1, & \text{узел концентрации } j \text{ активен и связан с узлом } \tilde{C}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (13)$$

$$\tilde{f}_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad j \in W, \quad \tilde{k} \in W \cup \tilde{C}, \quad (14)$$

где \tilde{f}_{ij} – поток из узла i на узел (j, k) , P – множество индексов расположений узлов концентрации информационных потоков СИС $|P| = m$; I – множество индексов расположений конечных узлов ИС $|I| = n$; W – множество индексов, где $W = I \vee P$; \tilde{C} – центральный узел; \tilde{d} – трафик конечного узла; \tilde{Q} – мощность каждого узла концентрации информационных потоков в ИС; \tilde{K} – мощность связи конечного узла ИС с другим конечным узлом; C_{ij} – стоимость под-

ключения узла i к узлу j ; C_{kc} – стоимость подключения узла концентрации информационных потоков в ИС к центральному узлу ИС, где $C_{kc} = 0 \forall k \in P$; C_j – стоимость открытия узла концентрации информационных потоков j и подключения к центральному узлу. Значения X_{ij} и Y_{jm} определяются следующим образом: $X_{ij} = 1$, если между узлами i и j есть связь, $i \in W$, $j \in W$; и $x_{ij} = 0$ в противном случае; $Y_{jm} = 1$, если узел концентрации j активен и соединен с центральным узлом C , и $Y_{jm} = 0$ в противном случае.

Значения следующих переменных являются нечеткими: \tilde{f}_{ij} с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{f}}$; \tilde{d} с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{d}}$; \tilde{Q} с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{Q}}$; \tilde{K} с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{K}}$.

Ограничение (2) создает только одну инцидентную дугу для каждого узла. Ограничение (3) связывает переменные с дугами. Ограничения (4) – (6) – ограничения по объединенным мощностям. Сохранение информационного потока организовано ограничениями (7) – (10). Ограничение (11) гарантирует, что узел концентрации открыт, если у него есть некоторые поступающие в него дуги. Оптимизационная задача (1) – (14) принадлежит классу трудновычисляемых задач [6].

Решение поставленной задачи для ее предельного случая, когда $\mu_{\tilde{f}} = 1$, $\mu_{\tilde{d}} = 1$, $\mu_{\tilde{Q}} = 1$, соответствует полученным ранее результатам решения задачи синтеза при условии использования четких параметров [7].

Список использованных источников

1. К вопросу о моделировании процесса распределения ресурсов в информационных системах / К. А. Набатов, Ю. В. Минин, С. Н. Коршиков, Х. Д. Льюнг // *Информация и безопасность*. – 2012. – Т. 15, № 4. – С. 461 – 470.
2. Ауад, М. Модель распределения ресурсов в сетевых информационных структурах / М. Ауад, Ю. В. Минин, Ю. Ю. Громов // *Вестник Воронежского института МВД России*. – 2013. – № 4. – С. 215 – 220.
3. Задача поиска параметров структуры типа «звезда–дерево» сетевой информационной системы при условии применения идентичных концентраторов / С. А. Копылов, С. В. Зайцев, М. Ауад и др. // *Современные информационные технологии*. – 2014. – № 19. – С. 7 – 11.
4. Определение оптимальных параметров структуры типа «звезда–дерево» сетевой информационной системы / Д. С. Соловьев, С. В. Зайцев, М. Ауад // *Современные информационные технологии*. – 2014. – № 19. – С. 11 – 15.

5. Методы анализа информационных систем / Ю. Ю. Громов и др. – Тамбов ; М. ; СПб. ; Баку ; Вена ; Гамбург : Изд-во МИНЦ «Нобелистика», 2012. – 220 с.

6. Gavish, B. Parallel Savings Heuristics for the Topological Design of Local Access Tree Networks / B. Gavish, K. Altinkemer // Proceedings of the IEEE Conference on Communications. – 1986. – P. 130 – 139.

7. Размещение узлов сетевой информационной системы с топологией «звезда–дерево» при условии идентичности их параметров / Ю. В. Минин, Г. Н. Нурутдинов, О. Г. Иванова, Н. А. Аль-Матари // Информация и безопасность. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 81 – 88.

А. Н. Пчелинцев

(Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия)

О ПОСТРОЕНИИ ПРИБЛИЖЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ ЛОРЕНЦА

Аннотация. Проблема поиска приближенных периодических решений с заданной точностью в аттракторе динамической системы Лоренца актуальна на сегодняшний день, так как они обладают свойством неустойчивости. Делается обзор метода, позволяющего при классических значениях параметров системы найти приближения к ним. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

A. N. Pchelintsev

(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

ON THE CONSTRUCTION OF APPROXIMATE PERIODIC SOLUTIONS OF THE LORENZ SYSTEM

Abstract. The problem of finding of approximate periodic solutions with a given accuracy in attractor of the Lorenz system is urgent today, because they have the property of instability. The article gives an overview of the method, which allows to find approximations to them for classical values of the system parameters. The results of a computational experiment are presented.

В данной работе рассмотрим динамическую систему Лоренца [1]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \sigma(x_2 - x_1), \\ \dot{x}_2 = rx_1 - x_2 - x_1x_3, \\ \dot{x}_3 = x_1x_2 - bx_3 \end{cases} \quad (1)$$

при классических значениях параметров $\sigma = 10$, $r = 28$ и $b = 8/3$.

Как известно [2], в системе (1) существует аттрактор, состоящий из всюду плотных гиперболических траекторий – неустойчивых циклов, определяющих поведение близких к ним решений.

Наиболее распространенным современным подходом к построению приближений к периодическим решениям системы (1) является применение символической динамики [3; 4], когда, по сути, отслеживается возвращаемость траекторий на аттракторе в окрестности своих точек, так как предельные траектории динамических систем обладают свойством рекуррентности (устойчивость по Пуассону каждой их точки). Но делать вывод из этого, что исследуемая траектория является циклом, ошибочно, так как предельные траектории систем третьего порядка и выше могут обладать более сложным поведением (примеры см. в [5]). Критику подобных выводов также можно найти, например, в книге [6].

Поэтому для отыскания приближений к неустойчивым циклам системы (1) нужен совершенно другой подход, не основанный на численном интегрировании. В работах [7; 8] применялся метод Линдштедта–Пуанкаре, однако при его использовании возникает проблема символического решения неоднородной линейной системы дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами.

В статье [9] был расширен метод гармонического баланса для построения приближений к периодическим решениям системы Лоренца с любой степенью точности. При этом устойчивость решения не влияет на ошибку получаемого приближения. Рассмотрим данный метод более подробно.

Представим приближение к периодическому решению системы (1) как

$$\begin{aligned} x_1(t) &\approx \tilde{x}_1(t) = x_{1,0} + \sum_{i=1}^h (c_{1,i} \cos(i\omega t) + s_{1,i} \sin(i\omega t)), \\ x_2(t) &\approx \tilde{x}_2(t) = x_{2,0} + \sum_{i=1}^h (c_{2,i} \cos(i\omega t) + s_{2,i} \sin(i\omega t)), \\ x_3(t) &\approx \tilde{x}_3(t) = x_{3,0} + \sum_{i=1}^h (c_{3,i} \cos(i\omega t) + s_{3,i} \sin(i\omega t)), \end{aligned} \quad (2)$$

где ω – неизвестная циклическая частота; h – заданное количество гармоник; $c_{1,i}, s_{1,i}, c_{2,i}, s_{2,i}, c_{3,i}, s_{3,i}$ – неизвестные коэффициенты перед соответствующими гармоническими функциями ($i = \overline{1, h}$); $x_{1,0}, x_{2,0}$ и $x_{3,0}$ – неизвестные постоянные члены.

Для получения замкнутой нелинейной системы алгебраических уравнений относительно неизвестных величин приближения (2) подставляются в систему (1), преобразуются произведения синусов и косинусов в суммы и приводятся подобные слагаемые. При этом зануляются амплитуды гармоник более

высокого порядка, т.е. для индекса $i > h$. Тогда мы получим систему, у которой количество неизвестных равно $3(1+2h)+1 = 6h+4$, а уравнений – на единицу меньше. Чтобы замкнуть систему, используем тот факт [4; 7], что искомое периодическое решение пересекает плоскость, проходящую через положения равновесия системы (1)

$$O_1(-\sqrt{b(r-1)}, -\sqrt{b(r-1)}, r-1), O_2(\sqrt{b(r-1)}, \sqrt{b(r-1)}, r-1)$$

и параллельную плоскости x_1Ox_2 . Тогда третья координата в начальном условии для искомого решения равна величине $r-1$, т.е. $\tilde{x}_3(0) = r-1$.

Применяя несложные преобразования [9], можно получить следующую систему алгебраических уравнений (далее запишем ее без знака системы, так как мы указываем общий вид уравнений для каждого номера $i = \overline{1, h}$):

$$\begin{aligned} i\omega s_{1,i} - 10c_{2,i} + 10c_{1,i} &= 0, \\ -i\omega c_{1,i} - 10s_{2,i} + 10s_{1,i} &= 0, \\ x_{1,0} - x_{2,0} &= 0, \\ i\omega s_{2,i} - 28c_{1,i} + c_{2,i} + x_{1,0}c_{3,i} + c_{1,i}x_{3,0} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{h-i} (c_{1,m}c_{3,m+i} + s_{1,m}s_{3,m+i}) + \\ + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{i-1} (c_{1,m}c_{3,i-m} - s_{1,m}s_{3,i-m}) + \frac{1}{2} \sum_{m=i+1}^h (c_{1,m}c_{3,m-i} + s_{1,m}s_{3,m-i}) &= 0, \\ -i\omega c_{2,i} - 28s_{1,i} + s_{2,i} + x_{1,0}s_{3,i} + s_{1,i}x_{3,0} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{h-i} (c_{1,m}s_{3,m+i} - s_{1,m}c_{3,m+i}) + \\ + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{i-1} (c_{1,m}s_{3,i-m} + s_{1,m}c_{3,i-m}) + \frac{1}{2} \sum_{m=i+1}^h (-c_{1,m}s_{3,m-i} + s_{1,m}c_{3,m-i}) &= 0, \\ -28x_{1,0} + x_{2,0} + x_{1,0}x_{3,0} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^h (c_{1,m}c_{3,m} + s_{1,m}s_{3,m}) &= 0, \\ i\omega s_{3,i} - x_{1,0}c_{2,i} - c_{1,i}x_{2,0} - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{h-i} (c_{1,m}c_{2,m+i} + s_{1,m}s_{2,m+i}) - \\ - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{i-1} (c_{1,m}c_{2,i-m} - s_{1,m}s_{2,i-m}) - \frac{1}{2} \sum_{m=i+1}^h (c_{1,m}c_{2,m-i} + s_{1,m}s_{2,m-i}) + \frac{8}{3}c_{3,i} &= 0, \\ -i\omega c_{3,i} - x_{1,0}s_{2,i} - s_{1,i}x_{2,0} - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{h-i} (c_{1,m}s_{2,m+i} - s_{1,m}c_{2,m+i}) - \\ - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{i-1} (c_{1,m}s_{2,i-m} + s_{1,m}c_{2,i-m}) - \frac{1}{2} \sum_{m=i+1}^h (-c_{1,m}s_{2,m-i} + s_{1,m}c_{2,m-i}) + \frac{8}{3}s_{3,i} &= 0, \end{aligned}$$

$$-x_{1,0}x_{2,0} - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^h (c_{1,m}c_{2,m} + s_{1,m}s_{2,m}) + \frac{8}{3}x_{3,0} = 0,$$

$$x_{3,0} + \sum_{i=1}^h c_{3,i} - 27 = 0.$$

В результате проведения численных экспериментов было найдено начальное приближение для циклической частоты, постоянных членов и амплитуд при $h = h_1 = 5$:

$$\omega = 4, x_{1,0} = x_{2,0} = x_{3,0} = 0, c_{1,i} = -1, i = \overline{1,5},$$

$$s_{1,j} = 0, j = 1, 3, 4, 5, s_{1,2} = 1.$$

Данный результат замечателен тем, что метод Ньютона, используемый для решения полученной системы алгебраических уравнений, сходится к решению, отличному от положений равновесия. Поэтому для улучшения точности приближенного периодического решения рассматривается система уравнений для значения h , равного некоторому $h_2 > h_1$. Полученное численное решение системы при $h = h_1$ берется как начальное приближение для амплитуд с индексами $i \leq h_1$ для системы с $h = h_2$, а значения начального приближения для амплитуд с индексами $i > h_1$ полагаются равными нулю.

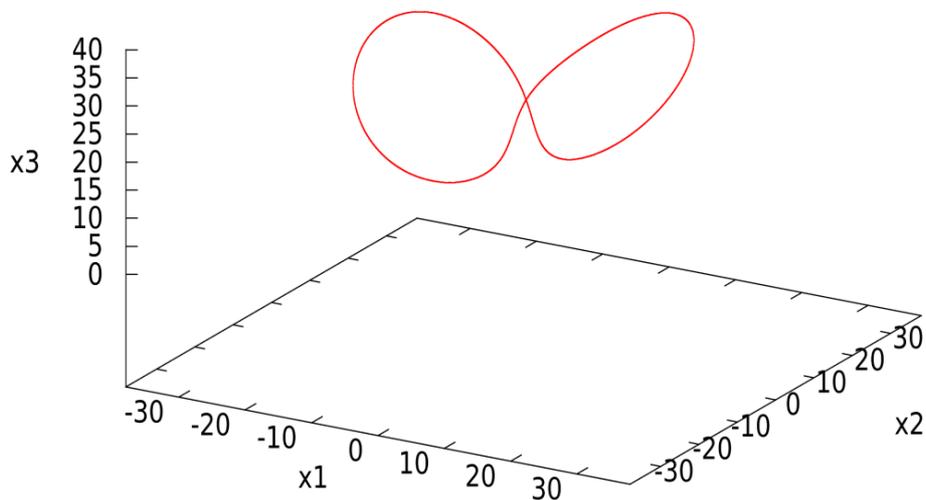


Рис. 1. Цикл, полученный методом гармонического баланса

При $h = 35$ и с точностью метода Ньютона, равной 10^{-8} , было получено приближение к периодическому решению, траектория которого представлена на рис. 1. Значение периода получается равным $T = 1,558652210$, начальное условие для полученного приближенного периодического решения –

$$\tilde{x}_1(0) = -2,147367631, \quad \tilde{x}_2(0) = 2,078048211, \quad \tilde{x}_3(0) = 27. \quad (3)$$

Начальные условия (3) были проверены на периоде в компьютерной программе, реализующей численное интегрирование системы (1) модифицированным методом степенных рядов [10] с точностью оценки общего члена ряда 10^{-25} , 100 бит под мантиссу вещественного числа и машинным эpsilon $1,57772 \cdot 10^{-30}$. При таких параметрах метода приближенные значения фазовых координат, полученные с помощью численного интегрирования, были также проверены тем же численным методом, но в обратном времени. Значения в обратном времени совпадают с (3) до 9-го знака включительно после точки. Результирующие же значения $x_1(T)$, $x_2(T)$ и $x_3(T)$ совпадают с (3) до 8-го знака включительно.

Список использованных источников

1. Lorenz, E. N. Deterministic nonperiodic flow / E. N. Lorenz // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1963. – Т. 20, № 2. – С. 130 – 141.
2. Tucker, W. A rigorous ODE solver and Smale's 14th problem / W. Tucker // Foundations of Computational Mathematics. – 2002. – Т. 2, № 1. – С. 53 – 117.
3. Рабинович, М. И. Стохастические автоколебания и турбулентность / М. И. Рабинович // Успехи физических наук. – 1978. – Т. 125, № 1. – С. 123 – 168.
4. Galias, Z. Validated study of the existence of short cycles for chaotic systems using symbolic dynamics and interval tools / Z. Galias, W. Tucker // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2011. – Т. 21, № 2. – С. 551 – 563.
5. Немыцкий, В. В. Качественная теория дифференциальных уравнений / В. В. Немыцкий, В. В. Степанов. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 552 с.
6. Lozi, R. Can we trust in numerical computations of chaotic solutions of dynamical systems? / R. Lozi // Topology and Dynamics of Chaos. In Celebration of Robert Gilmore's 70th Birthday. – World Scientific Series in Nonlinear Science Series A. – 2013. – Т. 84. – С. 63 – 98.
7. Viswanath, D. The fractal property of the Lorenz attractor / D. Viswanath // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2004. – Т. 190, № 1–2. – С. 115 – 128.
8. Viswanath, D. The Lindstedt-Poincare technique as an algorithm for computing periodic orbits / D. Viswanath // SIAM Review. – 2001. – Т. 43, № 3. – С. 478 – 495.
9. Пчелинцев, А. Н. Метод гармонического баланса для отыскания приближенных периодических решений системы Лоренца / А. Н. Пчелинцев, А. А. Полуновский, И. Ю. Юханова // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2019. – Т. 24, № 126. – С. 187 – 203.
10. Пчелинцев, А. Н. Численное и физическое моделирование динамики системы Лоренца / А. Н. Пчелинцев // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2014. – Т. 17, № 2. – С. 191 – 201.

ДИСКРЕТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И ТЕОРИЯ РАСПИСАНИЙ

Л. С. Чернышова, А. В. Галкин

(Липецкий государственный технический университет,
Липецк, Россия)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНА ОБСЛУЖИВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Аннотация. Решается задача оптимизации плана технологического обслуживания обвязочной машины, заключающаяся в минимизации затрат. Для этого строится математическая модель для расчета затрат на обслуживание. Построение оптимального решения осуществляется методом динамического программирования.

L. S. Chernyshova, A. V. Galkin

(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

SELECTING THE OPTIMUM PLAN FOR TECHNOLOGICAL MAINTENANCE OF INDUSTRIAL EQUIPMENT USING THE MODEL OF ITS FUNCTIONING

Abstract. In the work the problem of optimization of the plan of technological servicing of the strapping machine is solved. To do this, a mathematical model is constructed to calculate the cost of maintenance. The optimal solution is constructed using dynamic programming.

В работе рассматривается задача оптимизации плана обслуживания обвязочной машины РЗЗМ/НА. Обвязочная машина используется для наложения пластмассовой ленты на упаковочную тару. Пластмассовая лента накладывается на упаковки вручную или с помощью соответствующего прибора. После этого лента вводится в прибор, натягивается, сплавляется и отделяется от рулона пластмассовой ленты.

В качестве исходных данных для определения характеристик надежности машины были использованы сведения о ремонтах, выполненных в промежутке с 3 апреля 2012 по 16 июля 2014 года на одном из промышленных предприятий.

План технического обслуживания (ТО) обвязочной машины строится исходя из предположений, что каждая из n деталей машины может проходить обслуживание как отдельно, так и совместно с другими (в последнем случае достигается некий выигрыш в суммарной цене ТО, т.е. совместное ТО нескольких компонентов может быть дешевле, чем ТО каждого компонента

по отдельности), а вероятность сбоя детали каждой машины зависит от времени, прошедшего с последнего ТО [1]. Таким образом, цель заключается в минимизации выражения

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n c_i p_i(t - \tau_i(t)) + \sum_{A \subseteq \overline{1, n}} k(A) m(A), \quad (1)$$

где $m(A)$ – количество технических обслуживаний, в которых входили компоненты из множества A и только они; $\tau_i(t)$ – время последнего обслуживания (не обязательно отдельного) компонента i к моменту t ; $p_i(t)$ – вероятность отказа i -го компонента в момент времени t после его последнего технического обслуживания; c_i – ожидаемые убытки от поломки i -й детали; $k(A)$ – затраты на одновременное техническое обслуживание некоего множества A компонентов (это может быть любое из подмножеств множества $\overline{1, n}$). Функция $k(A)$ обладает свойством субаддитивности [2], т.е.

$$k(A_1 \cup A_2) \leq k(A_1) + k(A_2).$$

Модель (1) справедлива в предположении, что техническое обслуживание элемента переводит его в первоначальное состояние и что технические обслуживания могут проводиться исключительно в дискретные моменты времени.

Решение задачи можно получить с помощью методов динамического программирования [3]; его принцип (также называемый принципом оптимальности Беллмана) заключается в том, что решение на каждом шаге ищется в предположении о том, что все последующие шаги будут оптимальны по отношению к состоянию, полученному в результате этого шага [4]. Состояние системы же определяется количеством шагов, прошедших от последних технических обслуживаний каждого из компонентов системы. Рассмотрим произвольный момент времени $t, t \in \overline{1, T}$. Пусть известны моменты последних технических обслуживаний каждого компонента i , это моменты времени $t - j_i, j_i \in \overline{1, t}$. Обозначим за $R(t, j_1, \dots, j_n)$ наименьшее возможное при таких условиях математическое ожидание убытков за оставшийся период времени работы системы $[t; T]$, а за $u(t, j_1, \dots, j_n)$ управление в момент t , при котором достигается $R(t, j_1, \dots, j_n)$. Управление может принимать 2^n возможных значений – любое из подмножеств множества $\overline{1, n}$, начиная с \emptyset (ТО не проводится вообще) и заканчивая всем множеством $\overline{1, n}$ (ТО проводится для всех компонент сразу).

Для функции $R(t, j_1, \dots, j_n)$ справедливо следующее соотношение:

$$R(T, j_1, \dots, j_n) = \min_{A \in 2^{1, n}} \left\{ k(A) + \sum_{i \in A} c_i p_i(0) + \sum_{i \notin A} c_i p_i(j_i) \right\},$$

$$R(t, j_1, \dots, j_n) = \min_{A \in 2^{1, n}} \left\{ k(A) + \sum_{i \in A} c_i p_i(0) + \sum_{i \notin A} c_i p_i(j_i) + R(t+1, 1 + (1 \notin A)j_1, \dots, 1 + (n \notin A)j_n) \right\}, t > T. \quad (2)$$

Опираясь на это соотношение, можно последовательно вычислить $R(t, j_1, \dots, j_n)$, при $t = T, \dots, 1$, при этом параллельно с $R(t, j_1, \dots, j_n)$ вычисляется $u(t, j_1, \dots, j_n)$. Зная $u(1, 1, \dots, 1)$, можно вычислить состояние системы на последующих шагах и управление, которое должно быть выбрано на них. Подобный способ решения называется *обратным планированием* [5]. Алгоритм обратного планирования состоит из двух этапов: обратного и прямого.

Обратный ход:

1. Принять $t = T$.

2. Для всех комбинаций $(j_1, \dots, j_n), j_i \in \overline{1, t}$ (общее количество их равно t^n) вычислить $R(t, j_1, \dots, j_n)$ и $u(t, j_1, \dots, j_n)$ согласно формуле (2). В качестве u берется множество A , на котором достигается минимум.

3. Уменьшить t на единицу. Если $t = 0$, останов. Иначе перейти к пункту 2.

В ходе прямого этапа определяется, какие детали в какие моменты времени нужно обслуживать:

1. Принять $j_1 = \dots = j_n = 1, t = 1$.

2. Принять $j_i = 0$ для всех $i \in u(t, j_1, \dots, j_n)$, и принять решение о проведении в момент t технического обслуживания такого компонента i . Для $i \notin u(t, j_1, \dots, j_n)$, техническое обслуживание не проводится.

3. Увеличить t и все j_i на единицу. Если t равно $T+1$, останов, иначе переход к шагу 2.

Для частного случая, когда затраты на ТО множества A компонент заданы формулой

$$k(A) = \sum_{i \in A} k(\{i\}) + 0,2 \cdot \max_{i \in A} k(\{i\}). \quad (3)$$

Решение этой задачи было реализовано на языке C# [6] в среде Microsoft Visual Studio. Исходные данные для задачи вводятся в файл формата *.csv и могут быть также отредактированы в интерфейсе программы. В поле вывода выводятся данные о днях работы системы, когда следует проводить ТО, и о компонентах, которые должны в этом ТО участвовать. Пример работы программы приведен на рис. 1.

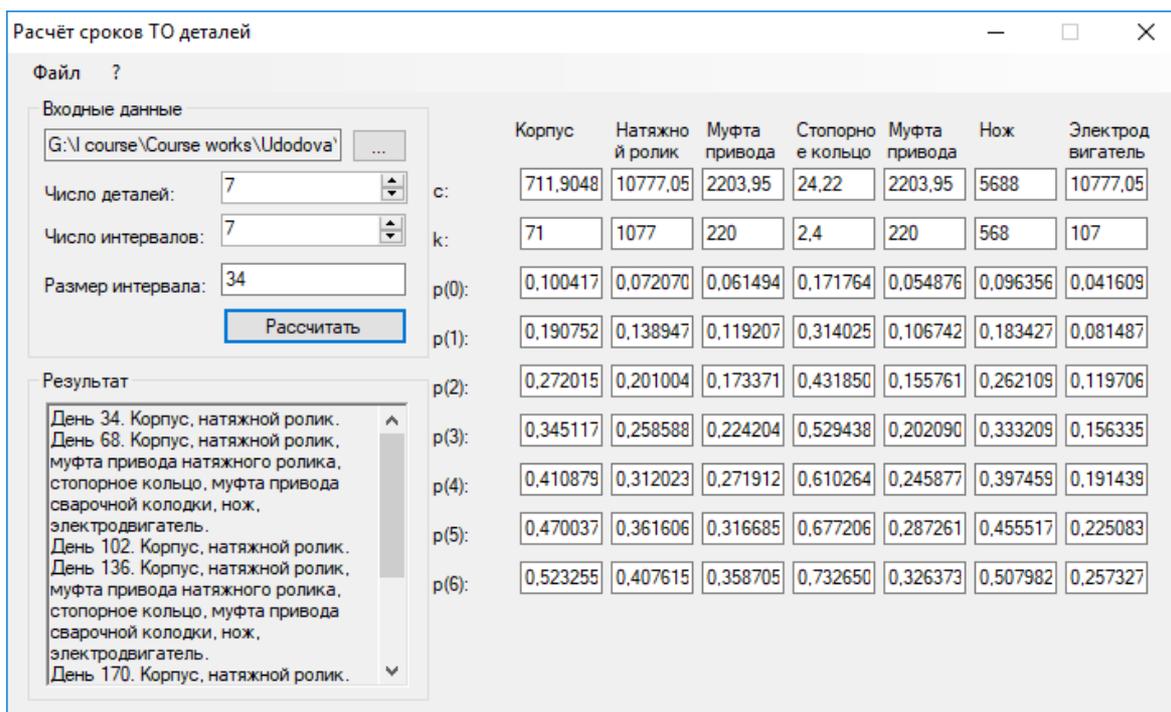


Рис. 1. Пример работы программы

Для данных, представленных на этом рисунке, две из семи представленных компонентов (корпус и натяжной ролик) следует обслуживать в конце каждого интервала работы системы, а остальные компоненты – каждый второй интервал.

Список использованных источников

1. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гу-ров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
2. Писарук, Н. Н. Введение в теорию игр / Н. Н. Писарук. – Минск : БГУ, 2015. – 256 с.
3. Коган, Д. И. Динамическое программирование и дискретная многокритериальная оптимизация / Д. И. Коган. – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2005. – 260 с.
4. Тодоровская, Я. В. Принцип оптимальности и уравнение Беллмана / Я. В. Тодоровская, А. В. Маркина, М. В. Кабанко / Математика и ее приложения в современной науке и практике : сб. науч. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф. (12–13 мая 2016 г.). – Юго-Зап. гос. ун-т., ЗАО «Университетская книга». – Курск, 2016. – 200 с.
5. Калихман, И. Л., Динамическое программирование в примерах и задачах / И. Л. Калихман, М. А. Войтенко. – М. : Высшая школа, 1979. – 125 с.
6. Язык программирования C# / А. Хейлсберг, М. Торгерсен, С. Вилта-мут, Голд П. – СПб. : Питер, 2012. – 784 с.

М. В. Лемкина, И. А. Канавалов, Р. К. Praveen
(Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия)

СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КАЛЕНДАРНЫМ ПЛАНИРОВАНИЕМ

Аннотация. Рассматривается концепция и структура построения архитектуры управляющей многомодульной системы с разделенными потоками данных для автоматизации процесса календарного планирования единичного производства. Описан механизм применения статических методов в планировании производства.

M. V. Lemkina, I. A. Kanavalov, R. K. Praveen
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

SOFTWARE PACKAGE STRUCTURE OF MANAGEMENT SCHEDULING SYSTEM

Abstract. The concept and structure of building the architecture of a control multi-module system with separated data streams for automating the scheduling process of a single production. The mechanism of applying static methods in production planning is described.

Современное развитие производства требует разработки и применения систем управления, которые качественно решают основные поставленные задачи, учитывают различные факторы, поэтому проектирование структуры программного комплекса является сложной и практически важной задачей.

На практике эффективность функционирования программных комплексов, предназначенных для управления производством, во многом зависит от используемых математических алгоритмов и методик решения данных задач. Особенностью исследуемой задачи построения системы управления в единичном и мелкосерийном производствах является большое разнообразие номенклатуры и частая смена объектов производства в программе каждого цеха и участка, в связи с этим при разработке программного комплекса особое внимание уделяется механизмам, позволяющим смоделировать процесс формирования календарного плана производства, а также математическим моделям, позволяющим корректировать производственный план в режиме реального времени.

Для составления календарного плана можно применять статические методы, которые предусматривают разработку фиксированного задания для всего планового периода (1, 6, 12 месяцев), включая параметры оперативного учета и контроля, в котором содержится план распределения работ в определенные сроки по времени на используемом производственном оборудовании; но задан-

ное задание является динамически изменяемым, так как в течение планового периода номенклатура производства постоянно расширяется за счет поступления новых заданий.

В рамках планирования единичного производства и построения производственной программы фиксируется ассортимент изделий, объем и график выпуска, используемые технологии и материалы комплектующих собственного производства и сторонних производителей. Диаграмма потоков данных для построения календарного плана единичного производства приведена на рис. 1.

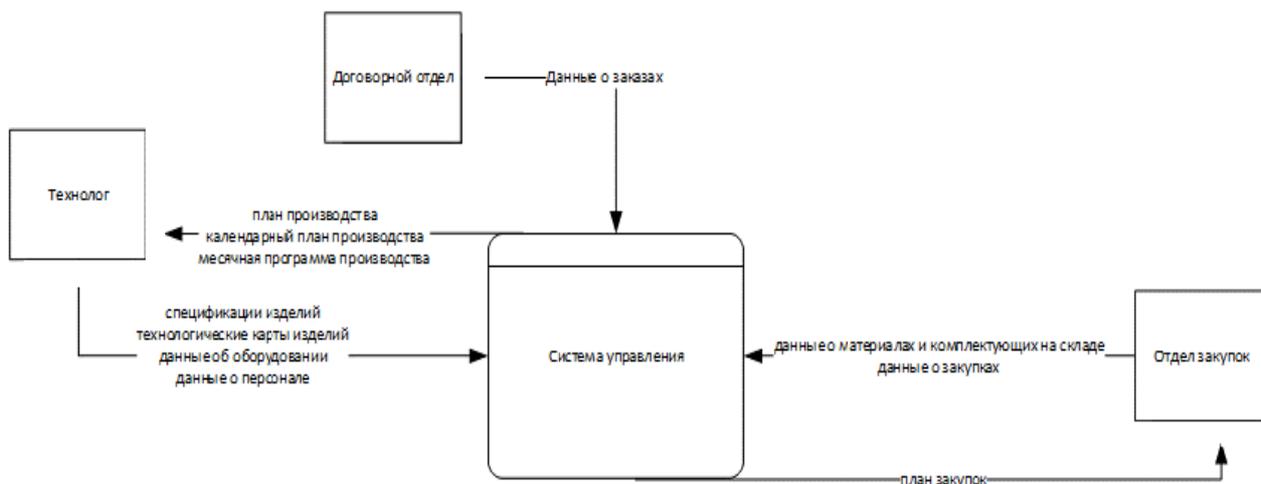


Рис. 1. Диаграмма потоков данных

Анализ основных функций управления единичным производством позволяет сделать вывод о возможности построения единого программного комплекса, позволяющего с минимальными временными затратами распределять нагрузку производства и адаптировать производство для выполнения конкретных задач. Структуру управляющей системы можно представить в виде совокупности модулей, для оптимизации сложной системы, учитывающей все множество особенностей задачи планирования единичного производства и обладающей универсальностью.

При создании программного комплекса можно выделить многократно используемые модули, провести их типизацию и унификацию. Управляющие модули задают последовательность вызова на выполнение модуля, взаимодействие между модулями обеспечивается за счет использования общей базы данных или межмодульной передачи данных. Программный комплекс состоит из нескольких функциональных групп программ (рис. 2):

- клиентская подсистема (пользовательский интерфейс), предоставляет пользователям системы инструменты ввода данных;
- модуль расчета необходимого числа рабочих мест, на основании трудоемкости каждого вида работ, входящих в заказ и фонда времени, обеспечен-

ного оборудованием, определяет количество рабочих мест (оборудования).
Выражение для расчета числа рабочих мест (1):

$$C_{\text{рм}} = \tau_3 / F_{\text{до}}, \quad T_{\text{цз}} = \tau_3 / (C_{\text{рм}} F_{\text{до}}), \quad (1)$$

где $C_{\text{рм}}$ – необходимое число рабочих мест; τ_3 – трудоемкость данного вида работ по заказу; $F_{\text{до}}$ – действительный фонд времени работы оборудования; $T_{\text{цз}}$ – длительность цикла обработки заказа;

– модуль расчета длительности производственного цикла, определяется в количестве рабочих дней, в зависимости от заказов (числа деталей, количества партий и т.д.), времени технологических процессов, числа рабочих мест и рабочего графика. Выражение для расчета (2):

$$T_{\text{пцпосл}} = n \sum t_{\text{шк}} / CK_{\text{см}} T_{\text{см}} + mt_{\text{мо}} / K_{\text{см}} T_{\text{см}} + T_{\text{е}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{пцпосл}}$ – длительность производственного цикла при последовательном виде движения в рабочих днях; n – число деталей в партии; m – число операций в технологическом процессе; $t_{\text{шк}}$ – норма штучно-калькуляционного времени на операцию, час; C – число рабочих мест, параллельно занятых выполнением операции; $K_{\text{см}}$ – число рабочих смен в сутках; $T_{\text{см}}$ – длительность рабочей смены, час; $t_{\text{мо}}$ – межоперационное время, час; $T_{\text{е}}$ – продолжительность естественных процессов (сушка, поверхностное легирование, охлаждение после термообработки и т.п.), дней;

– модуль определения календарных опережений подачи, необходим для согласованной бесперебойной работы цехов и поставки деталей, входящих в изделия, на сборку к заданному сроку;

– модуль формирования отчетности, предоставляет пользователям системы инструменты доступа к результатам расчетов. Выражение для расчета (3)

$$T_{\text{зап.заг.}} = (T_{\text{заг.}} + T_{\text{обработ.}} + T_{\text{сбороч.}}) + T_{\text{рез.заг.}} + T_{\text{рез.обр.}},$$

$$\tau_{\text{вып.заг.}} = (T_{\text{обр.}} + T_{\text{сбор.}}) + T_{\text{рез.заг.}} + T_{\text{рез.обр.}}, \quad (3)$$

$$Z_{\text{опереж.}} = N_{\text{дн.}} \tau_{\text{в}},$$

где $T_{\text{вып.заг.}}$ – время опережения запуска заготовок; $\tau_{\text{вып.заг.}}$ – время опережения выпуска заготовок; $Z_{\text{опереж.}}$ – уровень задела опережающий; $N_{\text{дн.}}$ – суточный выпуск изделия;

– модуль хранения данных (база данных), обеспечивает надежное хранение данных и оперативный доступ к ним.

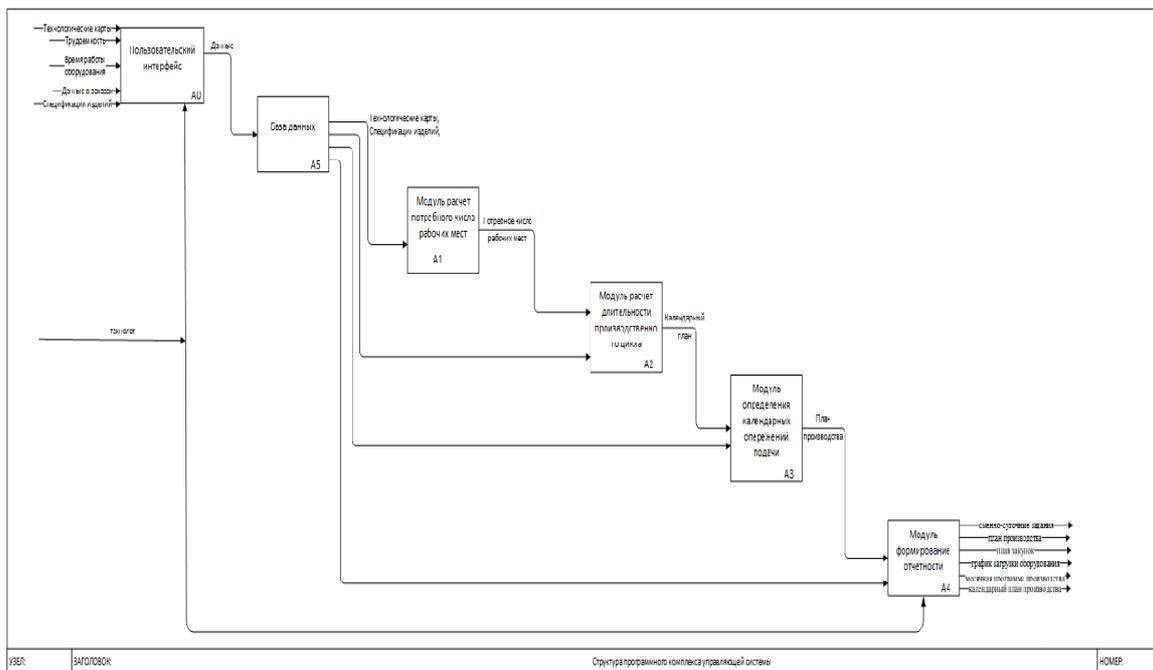


Рис. 2. Функциональная модель программного комплекса управляющей системы

Функциональную структуру разработанного программного комплекса можно условно разделить на три уровня. На первом уровне обеспечено хранение в базе данных: заказов, оборудования, спецификаций изделий, технологических карт, данных о состоянии склада. Уровень реализован с использованием СУБД MSSQ: Server, модель описания – реляционная, также разработан модуль взаимодействия с базой данных на уровне объектно-ориентированного описания сущностей на языке программирования C#.

На втором уровне реализован программный комплекс, обеспечивающий выполнение математических алгоритмов, включающий модуль расчета потребного числа рабочих мест, модуль расчета длительности производственного цикла, модуль определения календарных опережений подачи. На данном уровне производится расчет оптимального решения задачи планирования и выполнения производства единичной продукции с учетом всех входящих параметров.

На третьем уровне находятся разработанные пользовательские интерфейсы программного комплекса, обеспечивающие взаимодействие пользователя и системы, на основе графического пользовательского интерфейса пользователь может редактировать основные сущности, а также задавать режимы и параметры планирования производства, формировать отчетные формы.

Использование программного комплекса управляющей системы позволяет уменьшить финансовые затраты при построении календарного плана производства за счет экономии трудовых, сырьевых ресурсов, энергетических затрат и оптимального использования линий производства.

Работа выполнена на кафедре «Информационные процессы и управление» под руководством д-ра техн. наук, профессора Б. С. Дмитриевского.

С. А. Галахов^{1,2}, Е. М. Гришин^{1,2}

(¹Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
Москва, Россия,
²МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия)

ПОСТРОЕНИЕ РАСПИСАНИЯ РАБОТЫ ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО

Аннотация. Описаны эвристические алгоритмы построения расписания работы пункта технического обслуживания локомотивов. Проведено сравнение эффективности и скорости работы приведенных алгоритмов с алгоритмом полного перебора. Представленная постановка задачи отражает особенности работы пунктов технического обслуживания локомотивов Российских железных дорог.

S. A. Galakhov^{1,2}, E. M. Grishin^{1,2}

(¹V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia,
²M. V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia)

CONSTRUCTION OF THE LOCOMOTIVE DEPOT WORK SCHEDULE

Abstract. This article describes the heuristic algorithms for scheduling maintenance of locomotives. A comparison of the efficiency and speed of the above algorithms with a full search algorithm. The presented statement of the problem reflects the features of the maintenance points of Russian Railways locomotives.

Введение. Имеется граф железных дорог: станции, соединенные железнодорожными путями. По ребрам этого графа (железнодорожным путям) происходит движение поездов от одной вершины (станции) графа к другой. Имеется множество локомотивов, осуществляющее передвижение поездов. Каждому локомотиву соответствует некоторое подмножество ребер графа железных дорог, по которым возможно его перемещение (в силу технических особенностей). Все локомотивы приписаны к определенным участкам обслуживания локомотивов (УОЛ), по которым они обращаются и определенным ТЧЭ, где они проходят техническое обслуживание. Каждый локомотив движется согласно расписанию. Локомотив, как правило, не покидает границ УОЛа.

Для предотвращения поломок и сбоев в работе, каждому локомотиву необходимо обеспечить периодическое обслуживание в пункте технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ). Существует техническое обслуживание ТО-2, проведение которого регулируется пробегом от последнего ремонта и реализуется в ПТОЛ [1].

Постановка задачи. Каждый ПТОЛ является частью локомотивного депо. Сам ПТОЛ состоит из смотровых канав и необходимого для технического обслуживания локомотивов оборудования (далее слот). В определенные моменты времени (в силу наличия расписания движения локомотива) в депо прибывают локомотивы для прохождения обслуживания.

Имеется ряд условий, накладывающих ограничения на работу ПТОЛа:

- на одном слоте в определенный момент времени может проходить обслуживание только один локомотив,
- после начала обслуживания и до его завершения локомотив не может покинуть слот,
- после завершения обслуживания локомотив покидает ПТОЛ.

При прибытии локомотива в ПТОЛ может оказаться, что все слоты заняты. В связи с этим необходимо составить расписание обслуживания локомотивов в ПТОЛ. Составленное расписание должно соответствовать минимальному времени ожидания локомотивом обслуживания с учетом важности локомотива.

Исходные данные. Для каждого локомотива заданы:

- время прибытия локомотива на ПТОЛ – r_j ,
- время обслуживания локомотива на ПТОЛ – p_j ,
- вес (важность) обслуживания локомотива – w_j .

Пусть имеется ПТОЛ с тремя слотами и три типа локомотивов. Все локомотивы имеют одинаковое время обслуживания, но время прибытия на ПТОЛ и вес каждого локомотива могут быть различны. Множество всех локомотивов N состоит из трех подмножеств N_1, N_2, N_3 , соответствующих первому второму и третьему поколению соответственно.

Локомотивы из множества N_1 могут обслуживаться на любом слоте ПТОЛ. Локомотивы из множества N_2 могут обслуживаться только на слотах № 2 и № 3. Локомотивы из множества N_3 могут обслуживаться только на слоте № 3.

Пусть имеется расписание обслуживания локомотивов π , удовлетворяющее ограничениям на работу ПТОЛ и состоящее из расписаний π_1, π_2, π_3 , где каждому π_i соответствует расписание обслуживания локомотивов на i -м слоте. Каждое расписание π_1, π_2, π_3 состоит из времен начала обслуживания локомотивов, принадлежащих какому-либо из трех расписаний. Множество всевозможных расписаний π будем обозначать через Π .

Задача минимизации времени простоя с учетом важности локомотива по прибытии на ПТОЛ может быть сведена к нахождению расписания обслуживания π , при котором достигается минимум функции:

$$\sum_{j=1}^N w_j (C_{j(\pi)} - r_j - p_j), \quad (1)$$

где $C_{j(\pi)}$ – время окончания обслуживания j -го локомотива на ПТОЛ при расписании π ; r_j – время прибытия j -го локомотива на ПТОЛ; p_j – время обслуживания j -го локомотива на ПТОЛ; w_j – вес j -го локомотива.

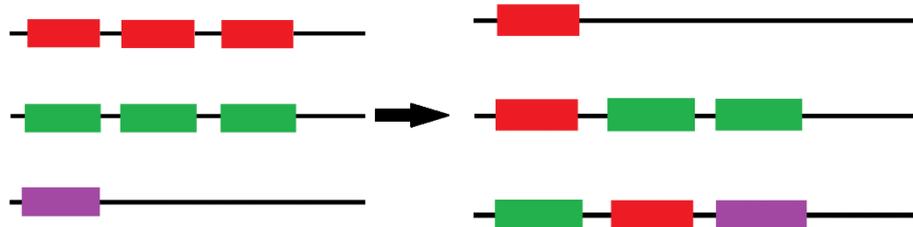
Описание алгоритма. Данная задача является NP-трудной [2]. Она может быть точно решена только с помощью метода полного перебора. Однако в общем случае метод перебора требует больших вычислительных мощностей и работает неприемлемо долго. Для решения данной задачи в данной работе использовались эмпирические алгоритмы, строящие расписание, при котором достигается локальный минимум целевой функции. Для анализа работоспособности эмпирических алгоритмов сравнивалось построенное ими расписание с расписанием, построенным методом полного перебора

Алгоритм № 1. Пусть все локомотивы стоят на одном слоте в порядке их прибытия в депо. Для сокращения времени составления расписания, при котором достигается минимум целевой функции для одного слота, может быть использован алгоритм, сравнивающий два рядом стоящих в очереди на обслуживание локомотива i и $i + 1$ по формуле

$$(p - r_i + r_{i+1})w_j \quad (p - r_{i+1} + r_i)w_{i+1}. \quad (2)$$

Если левая часть была больше правой, то локомотив i обслуживается раньше, чем $i + 1$. Если больше правая часть, то раньше обслуживается локомотив $i + 1$.

Алгоритм № 2. Пусть все локомотивы расставлены на слотах, соответствующих их поколениям. На каждом слоте локомотивы стоят в порядке прибытия на станцию. Для построения оптимального расписания на каждой дорожке используется алгоритм № 1. Когда оптимальное расписание на каждом слоте построено, можно начать перестановки (какие возможно) между слотами. Найдя среди локомотивов первого и второго поколения локомотив, при перестановке которого на третий слот общая целевая функция уменьшится больше всего, выполним перестановку. Повторяя данную процедуру до тех пор, пока при перестановке возможно уменьшение целевой функции, получим расписание, для которого целевая функция меньше или равна исходной. Далее проведем подобную процедуру перестановки локомотивов с первого слота на второй слот. Значение целевой функции для данного расписания будет не больше значения для исходного.

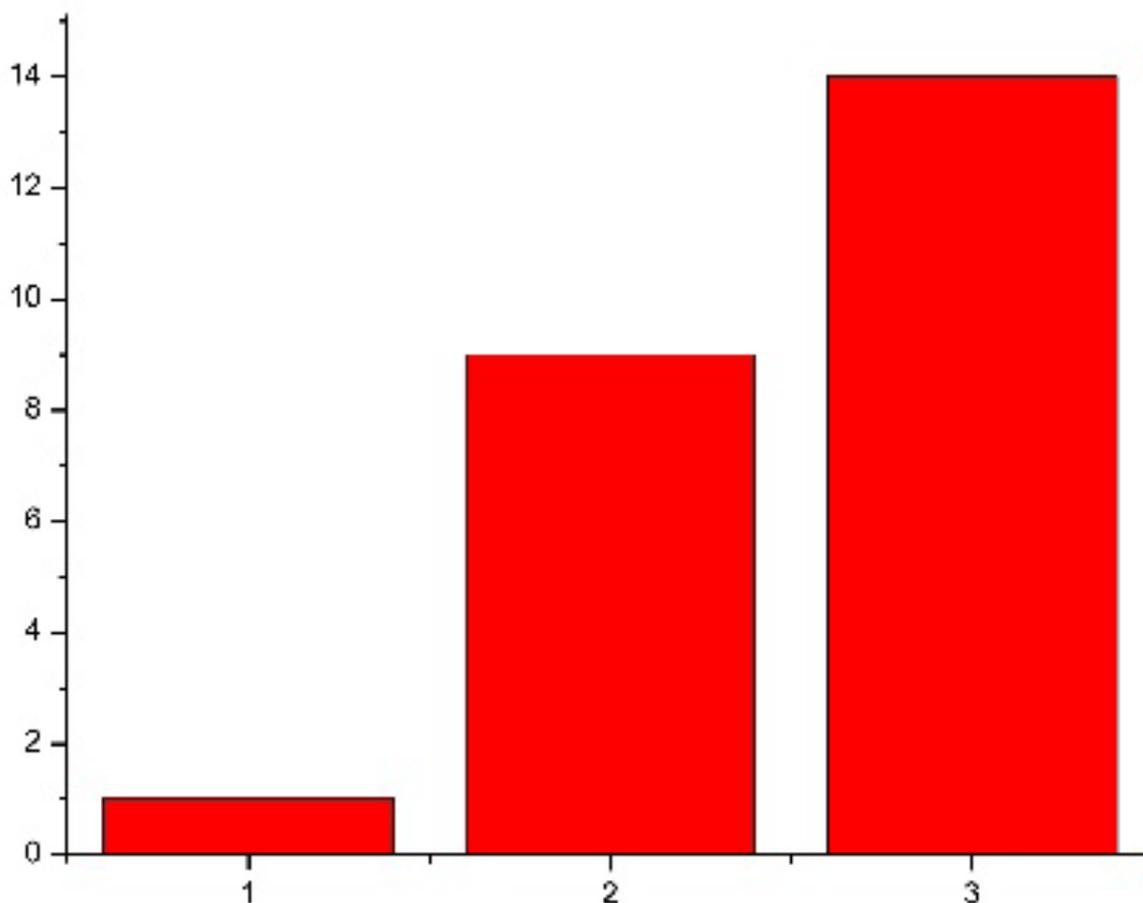


На рисунке каждая из трех черных линий соответствует слоту. Верхняя линия – первый слот, средняя – второй, нижняя – третий. Цвет поезда соответствует поколению. Красный цвет – первое поколение, зеленый – второе, фиолетовый – третье. Очередность начинается слева. Близость к левому краю определяет очередность обслуживания.

Алгоритм № 3. Пусть все локомотивы стоят на третьем слоте в порядке, определенном алгоритмом № 1. Выберем среди первого и второго поколения локомотивы, при перестановке которых на слот, соответствующий поколению, целевая функция уменьшается больше всего.

Получим расписание с целевой функцией меньше или равной, чем значение для исходного расписания. Теперь будем переставлять локомотивы, при перестановке которых на второй слот, целевая функция уменьшается больше всего. Далее повторим перестановку с третьего слота на второй и первый. Значение целевой функции для данного расписания будет не больше значения для исходного.

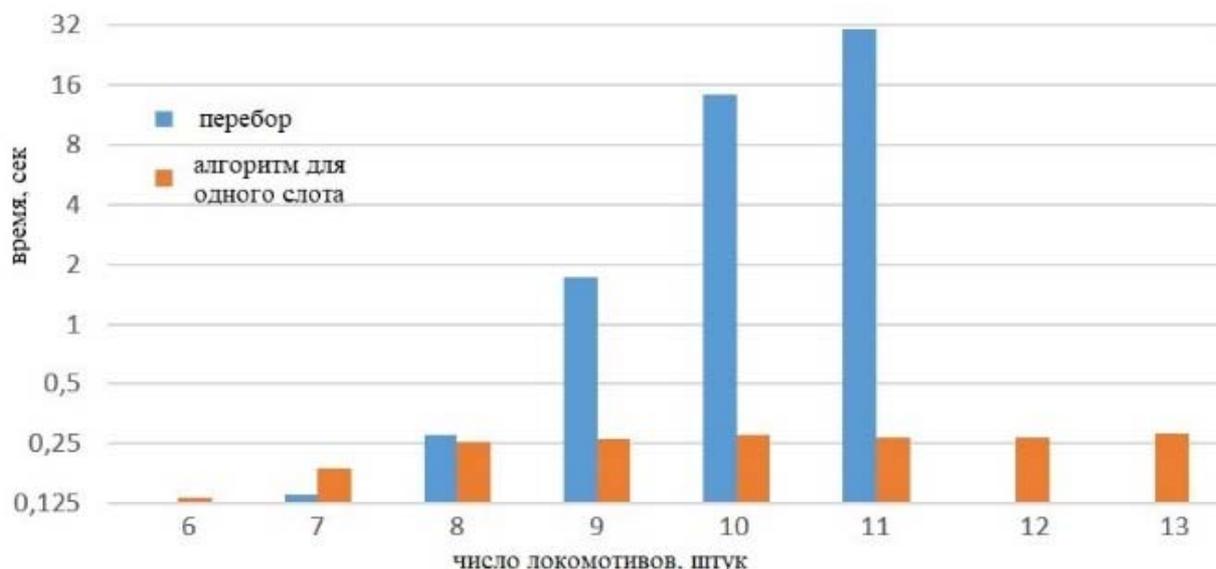
Сравнение. Путем сравнения алгоритма № 1 – 3 и алгоритма полного перебора на сгенерированных случайно примерах была получены результаты.



Отношение целевых функций 1 – алгоритм полного перебора, 2 – алгоритм № 2 перестановок с трех дорожек, 3 – алгоритм № 3 перестановок с третьей дорожки.

Алгоритм № 2 находил расписание, при котором достигался абсолютный минимум в 90% примеров, в которых число локомотивов не превышало 9. При числе локомотивов, не превосходящем 11, ошибка алгоритма 1 не превышала 10%.

Время работы алгоритма № 2 (№ 3) при распределении 10 локомотивов составляло в среднем 1(1,6) секунду, при распределении 15 локомотивов – 1,5(2,4) секунды.



Список использованных источников

1. Левин, Д. А. Теория оперативного управления перевозочным процессом: монография / Д. Ю. Левин. – М. : Учеб.-методический центр по образованию на ж.д. трансп., 2008. – 624 с.

2. J. Labetoulle, E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan “Preemptive scheduling of uniform machines subject to release dates.” Naval Research Logistics, 2, 1955.

Е. М. Гришин^{1,2}, С. А. Галахов^{1,2}, Н. А. Правдивец¹
(¹Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия,
²МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия)

ПОДХОДЫ К СОСТАВЛЕНИЮ РАСПИСАНИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАРКА ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. Представлен эвристический алгоритм составления расписания технического обслуживания локомотивов в депо. Представленная постановка задачи и тестовые данные соответствуют крупным полигонам Восточного полигона РЖД. Проведено сравнение предложенного алгоритма с методикой, принятой в РЖД.

E. M. Grishin^{1,2}, S. A. Galakhov^{1,2}, N. A. Pravdivets¹
(¹V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia,
²M. V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia)

APPROACHES TO THE SCHEDULING OF LOCOMOTIVES FLEET MAINTENANCE

Abstract. The paper presents a heuristic algorithm for scheduling of locomotives maintenance in the depot. The presented problem statement and test data correspond to the Eastern polygon of Russian Railways. A comparison of the proposed algorithm with the method adopted in Russian Railways was carried out.

Введение. Железнодорожное планирование – это сложный процесс управления большим количеством объектов, включающих железнодорожную инфраструктуру, подвижной состав и т.д., который требует учета множества взаимосвязанных условий. Целями такого планирования являются обеспечение безопасности функционирования всех элементов транспортной системы и минимизация задержек при оказании транспортных услуг. В данной работе рассматривается задача планирования технического обслуживания локомотивов, с которой тесно связаны как безопасность перевозок, так и их своевременность.

Постановка. Пусть K – множество групп ремонтных позиций в данном пункте технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ), m – их количество. Каждая группа состоит из двух ремонтных позиций. Каждая ремонтная позиция вмещает не больше 3 локомотивных секций (но не более одного локомотива). Локомотивы могут быть 1-, 2-, 3-, 4-секционные. Четырехсекционный локомотив обслуживается одновременно на двух ремонтных позициях. Для обслуживания сразу двух локомотивов на одной группе ремонтных позиций обе ремонтные позиции необходимо заполнить одновременно. При обслуживании четырехсекционного локомотива типа занимают обе ремонтные позиции одновременно (вся группа ремонтных позиций).

Пусть T – рассматриваемый горизонт планирования (плановые сутки). На начало плановых суток некоторые локомотивы могут проходить обслуживание, стоять на подъездных путях или в буфере. Пусть P – множество всех допустимых расписаний, а π – элемент множества P . Будем считать расписание допустимым, если оно удовлетворяет следующим условиям:

- в каждый момент времени на одной ремонтной позиции может находиться не более одного локомотива;
- для каждого локомотива определены место и время обслуживания;
- если время начала обслуживания локомотива выходит за пределы горизонта планирования, то такой локомотив должен быть рассмотрен в следующие плановые сутки;

- локомотивы, проходящие обслуживание на одной группе ремонтных позиций вдвоем, заходят и выходят с обслуживания одновременно;
- локомотив не может покинуть ремонтную позицию после начала обслуживания и до его окончания;
- локомотив может быть обслужен только один раз;
- время обслуживания локомотива одинаково для всех ремонтных позиций.

Таким образом, необходимо решить для каждого локомотива:

- должен ли он отправиться в буфер;
- когда и на какой подъездной путь он должен отправиться;
- когда и на какую ремонтную позицию он должен отправиться.

Алгоритм. Пронумеруем все локомотивы $1, 2, \dots, l, \dots, n$ по порядку их прибытия к ПТОЛ. Будем строить расписание обслуживания локомотивов пошагово, где на каждом шаге l будем рассматривать l первых прибывших к ПТОЛ локомотивов. Введем понятие частичного расписания π^l – расписание, полученное на этапе l с учетом l первых прибывших к ПТОЛ локомотивов. При этом каждое частичное расписание должно удовлетворять условиям допустимого расписания. Пусть $l_m(\pi^l)$ – номер последнего обслуживаемого локомотива на группе ремонтных позиций $m \in M$ при расписании π^l . При этом в частичном расписании π^l некоторые локомотивы могут не пройти обслуживание, а находиться в буфере. В момент прибытия локомотива l к ПТОЛ из $l-1$ ранее прибывших локомотивов можно выделить следующие подмножества: множество I_l локомотивов, которые сразу отправились на подъездные пути; множество D_l локомотивов, которые побывали в буфере, а потом отправились на подъездные пути; множество B_l локомотивов, которые в момент прибытия r_l локомотива l находятся в буфере. Для каждого локомотива i из множеств I_l и D_l введем время захода локомотива на подъездной путь \bar{r}_i , причем для каждого локомотива $i \in I_l: \bar{r}_i = r_i$. Обозначим через $S^i(\pi^l), i \in I_l \cup D_l$ время захода локомотива i на ремонтную позицию, а время выхода локомотива обозначим через $C^i(\pi^l)$ в частичном расписании π^l . В начале каждого шага проводится процедура выбора множества групп ремонтных позиций K^l , удовлетворяющих условиям допустимого расписания, таких, что на них может быть обслужен локомотив l : подъездные пути, ведущие к этим группам ремонтных позиций, должны удовлетворять условию вместимости подъездных путей и условию, что серия локомотива l может быть обслужена на них. Если эти условия не могут быть выполнены на данном шаге в момент прибытия r_l локомотива l , то локомотив отправляется в буфер ограниченной емкости (работает по схеме LIFO). В случае, когда локомотив не может встать на подъездной путь, а в буфере нет свободных мест, то расписание π^{l-1} является недопустимым.

В момент прибытия локомотива l на некоторых подъездных путях перед группами ремонтных позиций множества K^l (если оно не пустое) могут стоять локомотивы. Если количество секций локомотива l меньше четырех, а некоторые локомотивы $l_m(\pi^{l-1})$, $m \in K^l$ в расписании π^{l-1} обслуживаются одни, то в алгоритме рассматриваются две возможности: локомотив l отправляется на подъездной путь и будет проходить обслуживание один, локомотив l отправляется на подъездной путь и будет проходить обслуживание вместе с локомотивом $l_m(\pi^{l-1})$ на некоторой группе ремонтных позиций m . Тогда для локомотива l время его захода на ремонтную позицию и выхода с нее определяются следующими формулами:

- если локомотив l обслуживается один на группе ремонтных позиций m :

$$S^l(\pi^l) = \max(\bar{r}_l, C^{l_m(\pi^{l-1})}(\pi^{l-1})), \quad (1)$$

$$C^l(\pi^l) = S^l(\pi^l) + \tau_l, \quad (2)$$

$$l_m(\pi^l) = l; \quad (3)$$

- если локомотив l обслуживается вместе с локомотивом $l_m(\pi^{l-1})$ в расписании π^l , а в расписании π^{l-1} локомотив $l_m(\pi^{l-1})$ обслуживается один на группе ремонтных позиций m :

$$S^l(\pi^l) = \max(\bar{r}_l, S^{l_m(\pi^{l-1})}(\pi^{l-1})), \quad (4)$$

$$C^l(\pi^l) = S^l(\pi^l) + \max(\tau_l, \tau_{l_m(\pi^{l-1})}), \quad (5)$$

$$S^{l_m(\pi^{l-1})}(\pi^l) = S^l(\pi^l), \quad C^{l_m(\pi^{l-1})}(\pi^l) = C^l(\pi^l). \quad (6)$$

Если количество секций локомотива l равно четырем и множество ремонтных позиций K^l не пустое, то для него рассматривается только один вариант: локомотив l отправляется один (так как занимает всю группу ремонтных позиций целиком) на первую освободившуюся ремонтную позицию, время захода и выхода с которой определяется по формулам (1) – (3). При постановке локомотива l на подъездной путь он становится последним локомотивом, обслуживаемым на группе ремонтных позиций $m \in K^l$ в расписании π^l (3). Если множество групп ремонтных позиций K^l пусто, локомотив l отправляется в буфер, и время его постановки и выхода с ТО-2 будет определено позже.

Если между прибытием локомотива l и прибытием локомотива $l + 1$ некоторые локомотивы зашли с подъездных путей на ремонтные позиции, на их место можно поставить локомотивы из буфера. Пусть первым завершил обслуживание локомотив j в момент времени $C^j(\pi^l)$. Тогда можно аналогично определить множество групп ремонтных позиций K^e для некоторого локомотива e . Время его подхода на подъездные пути будет определяться как $\bar{r}_e = C^j(\pi^l)$ и будет зависеть от группы ремонтных позиций $m \in K^l$. Время захода $S^e(\pi^{l+1})$

на ремонтную позицию и время выхода $C^e(\pi^{l+1})$ с нее для локомотива e определяются по формулам (1) – (7). Аналогичная процедура постановки из буфера на подъездные пути проводится для всех локомотивов $e \in B_l$ из буфера, если $\bar{r}_e < r_{l+1}$.

Теперь, когда введены время захода локомотива i на ремонтную позицию $S^i(\pi^l)$, $i \in I_l \cup D_l$ и время выхода локомотива $C^i(\pi^l)$ в частичном расписании π^l , можно ввести частичные целевые функции:

$$1) \text{ суммарный простой: } F_1^l(\pi^l) = \sum_{i \in I_l \cup D_l} (C^i(\pi^l) - p_i - r_i), \quad (7)$$

$$2) \text{ суммарное время ожидания: } F_2^l(\pi^l) = \sum_{i \in I_l \cup D_l} S^i(\pi^l), \quad (8)$$

$$3) \text{ максимальное время ожидания: } F_3^l(\pi^l) = \max_{i \in I_l \cup D_l} (S^i(\pi^l) - r_i), \quad (9)$$

4) время обслуживания всех локомотивов:

$$F_4^l(\pi^l) = \max_{i \in I_l \cup D_l} C^i(\pi^l). \quad (10)$$

Выбирая на каждом этапе l вариант, соответствующий минимальному значению частичной целевой функции (в зависимости от ремонтной позиции, на которой обслуживается локомотив), получим конечное расписание π^n . При этом некоторые локомотивы $e \in B_n$ могут находиться в буфере. Для всех них проводится процедура постановки из буфера на подъездные пути, соответствующая минимальному значению частичной целевой функции. Таким образом, получаем финальное расписание $\pi \in P$ и значение целевой функции, вычисляемое по формулам частичных целевых функций (в буфере не осталось локомотивов).

Таким образом, для шага i справедливо:

Если существуют $S^j(\pi^{i-1}) \in (r_{i-1}, r_i]$, $j \in I_{i-1} \cup D_{i-1}$, то производится проверка буфера. Если $B_{i-1} \neq \emptyset$, то для последнего локомотива $l \in B_{i-1}$ определяется возможное множество групп ремонтных позиций K^l . Если $K^l \neq \emptyset$, то $\bar{r}_l = C^j(\pi^{i-1})$, $j \in I_{i-1} \cup D_{i-1}$, $m \in K^l$. По формулам (1) – (6) выбирается тот вариант постановки на некоторую ремонтную позицию из $m \in K^l$ вместе или без локомотива $l_m(\pi^{i-1})$, который соответствует минимальному значению частичной целевой функции (7) – (10). Аналогичная процедура проводится для остальных локомотивов из буфера.

Для локомотива i производится выбор групп ремонтных позиций K^i . Если $K^i \neq \emptyset$, то по формулам (1) – (7) определяются время захода $S^i(\pi^i)$ локомотива i на ремонтную позицию и время выхода локомотива $C^i(\pi^i)$ в частичном расписании π^i . Выбирается тот вариант постановки на некоторую ремонтную позицию из $m \in K^i$ вместе или без локомотива $l_m(\pi^{i-1})$ (с учетом локомотивов, покинувших буфер), который соответствует минимальному значению частичной целевой функции. Если K^i пустое, то локомотив i отправляется в буфер.

Результаты и выводы. Предложенные подходы решения поставленной задачи были протестированы на данных, соответствующих крупным предприятиям Восточного полигона. Каждый тестовый набор данных имеет свои особенности. Например, в одном наборе наблюдается нехватка ремонтных бригад (не все ремонтные позиции могут работать одновременно). Было проведено сравнение с методикой, принятой в РЖД, которое показало, что предложенная эвристика более выигрышна по сравнению с существующей методикой в большинстве случаев.

Список использованных источников

1. Собенин, Л. А. Организация, планирование и управление локомотиворемонтным производством : учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта / Л. А. Собенин, А. А. Зайцев, Б. А. Чмыхов ; под ред. Л. А. Собенина. – М. : Маршрут, 2006. – 439 с
2. Левин, Д. А. Теория оперативного управления перевозочным процессом : монография / Д. Ю. Левин. – М. : Учеб.-методический центр по образованию на ж.д. трансп., 2008. – 624 с.
3. Лазарев, А. А. Метрика для задачи минимизации суммарного запаздывания / А. А. Лазарев, П. С. Коренев, А. А. Сологуб. – М. : ИПУ РАН; Управление Большими Системами. – 2015. – Вып. 57. – С. 123 – 137.

В. А. Истомина, А. В. Галкин

(Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия)

ФОРМИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ МОНТАЖНЫХ ПАРТИЙ НА СТАНАХ ГОРЯЧЕГО ПРОКАТА

Аннотация. Рассмотрен процесс формирования монтажей горячекатаного проката. Реализован алгоритм формирования монтажей с помощью блока программирования Mathcad. На основе полученного алгоритма сформированы начальные популяции генетических алгоритмов для решения задачи оптимального формирования монтажей.

V. A. Istomin, A. V. Galkin

(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

FORMATION OF INITIAL PARTIES OF INSTALLATION PARTIES ON HOT ROLLS

Abstract. In this paper, the process of forming assemblies of hot-rolled steel is considered. Implemented an algorithm for forming edits using the Mathcad programming unit. Based on the obtained algorithm, initial populations of genetic algorithms are formed to solve the problem of optimal formation of montages.

Введение. Основными показателями конкурентоспособности продукции является ее качество и стоимость. При производстве горячекатаной полосы показатели качества определяются в первую очередь механическими свойствами и точностью ее геометрических размеров, а стоимость во многом зависит от производительности.

Прокатка металла на непрерывном широкополосном стане осуществляется монтажными партиями при соблюдении целого ряда различных технологических ограничений, призванных обеспечить требуемое качество проката [1]. В связи с этим вопросы планирования монтажных партий на прокатку приобретают особую актуальность. Использование при этом математических методов позволяет оптимизировать данный процесс по различным критериям оптимальности, которые могут быть сформированы. Такой подход позволяет оптимизировать процесс составления монтажных партий, и тем самым повысить производительность стана и снизить расход энергоресурсов.

Составление монтажных партий. Методические нагревательные печи относятся к наиболее распространенному типу нагревательных печей. Методическая печь – проходная печь для нагрева металлических заготовок перед обработкой давлением. В свою очередь, проходной печью называется печь непрерывного действия, в которой нагреваемые заготовки движутся вдоль печи, перемещаемые толкателем, рольгангом или другими механизмами. Загрузка и выгрузка проходной печи производятся через окна в торцовых стенах печи или в боковых стенках вблизи торцов.

Методические печи классифицируют:

- по числу зон отопления в сварочной зоне плюс методическая зона, и, если есть, томильная зона (2-, 3-, 4-, 5-зонные);
- по способу транспортирования заготовок (толкательные, с подвижными балками и др.);
- по конструктивным особенностям (с нижним обогревом, с наклонным подом, с плоским сводом и т.д.).

Ориентировочные значения отдельных показателей качества: температура нагрева заготовок в методических печах 1100...1250 °С; перепад температуры в конце нагрева – 400...1000 °С/метр толщины заготовки; количество окислившегося металла – 0,5...2,0%; толщина обезуглероженного слоя – 0,5...1,5 мм.

Именно для печей такого типа будет проходить формирование монтажных партий.

Ручное составление монтажных партий на прокатку в силу огромного количества производственных заказов и технологических ограничений, а также постоянно изменяющихся условий производства, является чрезвычайно трудоемким и требует от инженера-фабрикатора максимальной концентрации внимания и опыта [2]. Составление монтажных партий представляет собой планирование производства на стане, что, в свою очередь, требует от составленного

плана оптимальности. В качестве критериев оптимальности могут выступать: максимально возможный размер (вес) монтажной партии, температура (при горячем посаде), срочность выполнения заказов и ряд других. Таким образом, процесс формирования монтажной партии представляет собой комбинаторную задачу большой размерности, оптимальное решение которой невозможно без привлечения математического аппарата.

Монтажная партия (монтаж) представлена в виде табличной формы последовательности выполнения заказов (заявок) на прокатку на стане в течение одной кампании рабочих валков клетей чистовой группы. Условно монтажные партии подразделяются на следующие типы [3, 4]:

- монтаж анизотропной электротехнической (трансформаторной) стали;
- монтаж с изотропной электротехнической (динамной) сталью;
- монтаж с подкатом 1-й группы отделки поверхности;
- монтаж тончайшего проката;
- монтаж подката;
- монтаж особонизкоуглеродистой стали;
- монтаж низкоуглеродистой стали.

Оптимизировать формирование монтажей позволяют генетические алгоритмы. Генетические алгоритмы – это стохастические, эвристические оптимизационные методы, впервые предложенные Джоном Холландом в 1975 г. [5, 6]. Они основываются на идее эволюции с помощью естественного отбора. В настоящее время успешно используются для решения ряда экономически значимых задач в бизнесе и инженерных разработках.

Для получения начальных популяций был написан алгоритм формирования монтажей на основе предоставленных ограничений. Для реализации алгоритма был использован блок программирования математического пакета Mathcad, фрагмент которого показан на рис. 1.

Ниже представлено описание программы и использованных встроенных функций.

Команда $ORIGIN:=1$ означает, что началом отсчета индексов для матриц и векторов является 1. Это сделано для удобства использования программы.

$Рарка:= «...»$ – созданная переменная, которая хранит в себе путь до Excel файла с данными, необходимыми для формирования монтажей.

Для моделирования программы была использована предоставленная с металлургического производства информация об имеющихся на складе слябах. $READEXCEL (...)$ – встроенная команда, позволяющая считывать данные из файла Excel в пределах указанного диапазона, которые будут храниться в переменной X. Эти данные являются набором векторов, каждый из которых соответствует слябу со следующими параметрами: X1 – марка стали, X2 – ширина, X3 – длина, X4 – толщина, X5 – масса, X6 – группа отделки, X7 – количество проката с такими параметрами, $column$ – переменная, в которой хранится коли-

чество столбцов данных. Подсчет производит команда `cols (...)`, `line` – хранит количество строк данных, полученных с помощью команды `rows (...)`. `sortX` – содержит в себе отсортированные по убыванию X_2 данные массива X . `csort` – возвращает строки матрицы, отсортированные в порядке возрастания. `reverse` – обращает порядок элементов строк матрицы.

```

FormMontag
ORIGIN:=1
Папка:= "F:\Учеба\FM\"
X:=READEXCEL(concat(Папка, "data_FM.xlsx"), "Sheet1!A2:G789")
column:=cols(X)=7
line:=rows(X)=788

 $\hat{X}_1$ =[ "08Ю" 1270 9350 90 8.37 "1rp" 1 ]
sortX:=(reverse(csort(X,2)))
montag:=
|| k ← 1
|| mass ← sortX1,5
|| n ← 1
|| amount ← sortX1,7
||  $Y_1$  ← sortX $\hat{1}$ 
|| for i ∈ 2..line
|| || if (mass + sortXi,5) < 4000
|| || || k ← k + 1
|| || ||  $Y_k$  ← sortX $\hat{i}$ 
|| || || mass ← mass + sortXi,5
|| || || amount ← amount + sortXi,7
|| || ||
|| || ||  $M_n$  ←  $\begin{bmatrix} Y \\ mass \\ amount \\ n \end{bmatrix}$ 
|| || || Y ← NaN
|| || while k ≠ line
|| || || mass ← 0
|| || || kvr ← 1
|| || || Y ← 0
|| || || amount ← 0
|| || || for i ∈ (k + 1)..line
|| || || || if (mass + sortXi,5) < 4000
|| || || || || k ← k + 1
|| || || || ||  $Y_{kvr}$  ← sortX $\hat{i}$ 
|| || || || || mass ← mass + sortXi,5
|| || || || || amount ← amount + sortXi,7
|| || || || || kvr ← kvr + 1
|| || || || ||
|| || || || ||  $n$  ← n + 1
|| || || || ||  $M_n$  ←  $\begin{bmatrix} Y \\ mass \\ amount \\ n \end{bmatrix}$ 
|| || || || ||
|| || || || || M

```

Рис. 1. Фрагмент кода программы в Mathcad

Далее происходит формирование монтажей с помощью реализованной программы, где k – счетчик количества строк; $mass$ – общая масса монтажной партии; n – номер монтажной партии; $amount$ – общее количество проката в монтажной партии; Y – массив данных монтажной партии; Mn – монтажная партия номер n ; kvr – счетчик количества строк конкретной монтажной партии.

Пример сформированных начальных популяций монтажных партий приведен на рис. 2.

$montag_T =$	$[[[96 \times 1]]$	$[[[85 \times 1]]$	$[[[85 \times 1]]$	$[[[74 \times 1]]$	$[[[48 \times 1]]$	$[[[53 \times 1]]$	$[[[71 \times 1]]$
	$[[3994.85]$	$[[3997.02]$	$[[3994.09]$	$[[3999.62]$	$[[3996.54]$	$[[3999.25]$	$[[3996.17]$
	$[[157]$	$[[173]$	$[[160]$	$[[171]$	$[[170]$	$[[168]$	$[[166]$
	$[[1]$	$[[2]$	$[[3]$	$[[4]$	$[[5]$	$[[6]$	$[[7]$
	$[[[76 \times 1]]$	$[[[91 \times 1]]$	$[[[82 \times 1]]$	$[[[27 \times 1]]$			
	$[[3997.29]$	$[[3998.36]$	$[[3994.17]$	$[[1250.72]$			
	$[[198]$	$[[204]$	$[[209]$	$[[71]$			
	$[[8]$	$[[9]$	$[[10]$	$[[11]$			

Рис. 2. Полученные монтажные партии

Расположение прокатов соответствует критерию «от широкого к узкому», а общая масса каждого из полученных монтажей не превышает 4000 т. Полученные монтажи позволяют выполнить комплектацию начальных популяций для дальнейшего решения задачи оптимизации с помощью генетических алгоритмов.

Список использованных источников

1. Алгоритм оперативного посада металла в печи листопрокатного стана / Д. С. Каплан, Д. Х. Девятов, А. В. Белянский и др. – М. : Сталь, 2007. – № 2. – С. 130 – 132.
2. Луговской, В. М. Алгоритмы систем автоматизации прокатных станов / В. М. Луговской. – М. : Metallurgia, 1974. – 320 с.
3. Полухин, В. П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов / В. П. Полухин. – М. : Metallurgia, 1972. – 512 с.
4. Математическая модель формирования монтажных партий на прокатку в условиях НШСГП 2000 ОАО НЛМК. Листопрокатное производство / В. А. Третьяков, А. И. Останков, В. В. Барышев и др. // Производство проката. – Ежемес. произв. и науч. журнал. – 2006. – № 8. – С. 16 – 20.
5. Панченко, Т. В. Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.
6. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.

Н. А. Правдивец, Д. И. Архипов, И. А. Тарасов
(Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
Москва, Россия)

ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНА ПРОЕКТА С РЕСУРСНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ: СВЯЗЬ МЕЖДУ МОМЕНТАМИ НАЧАЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ И ОТНОШЕНИЯМИ ПРЕДШЕСТВОВАНИЯ

Аннотация. Рассмотрена задача построения плана проекта с ресурсными ограничениями. Показана связь между отношениями предшествования работ и их допустимыми моментами начала/окончания выполнения. Предложен алгоритм согласования доменов работ и связывающих их отношений предшествования.

N. A. Pravdivets, D. I. Arkhipov, I. A. Tarasov
(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia)

TASK OF CONSTRUCTING A PROJECT PLAN WITH RESOURCE RESTRICTIONS: COMMUNICATION BETWEEN MOMENTS OF THE BEGINNING OF WORKS AND PREPARATION RELATIONS

Abstract. The task of building a project plan with resource constraints is considered. The relationship between the relationships of the precedence of the work and their permissible moments of the beginning / end of execution is shown. An algorithm is proposed for matching work domains and their preceding relationships.

Введение. Рассматривается задача оптимального планирования проекта с учетом ресурсных ограничений. В англоязычной литературе данная задача известна под названием Resource-Constraint Project Scheduling Problem (RCPSp). Данная задача является одной из наиболее известных в теории расписаний и относится к классу NP-трудных в сильном смысле [1].

Существует большое количество методов нахождения оптимальных и приближенных решений данной задачи. Подробные обзоры существующих алгоритмов, а также их сравнительный анализ представлены в работах [2 – 7]. Среди точных методов решения задачи наиболее популярными являются Целочисленное программирование (Integer Linear Programming) и Программирование в ограничениях (Constraint Programming). Сравнение и анализ существующих моделей Целочисленного программирования для решения задачи RCPSp представлено в работах [8, 9]. Обзоры существующих статей по решению задачи RCPSp с использованием метода Программирования в ограничениях представлены в работах [10 – 12].

Скорость нахождения решения с использованием данных методов зависит не только от количества работ, но и от наличия связывающих их отношений

предшествования, а также от размеров областей допустимых значений моментов начала обслуживания каждой из работ. Сокращение таких областей сужает область поиска оптимальных расписаний и повышает эффективность применяемых методов. В данной работе рассматривается связь между допустимыми моментами начала обслуживания работ и отношениями предшествования.

Постановка задачи. Классическая постановка задачи может быть сформулирована следующим образом. Имеется множество работ N , которые должны быть выполнены с использованием множества возобновляемых ресурсов R . Доступное количество ресурса $r \in R$ определяется числом c_r . Для каждой работы $j \in N$ определены следующие параметры:

- p_j – время выполнения;
- r_j – момент поступления;
- d_j – директивный срок, момент времени, до которого работа должна быть выполнена;
- a_{jr} – количество ресурса $r \in R$, используемого в каждый момент времени выполнения работы.

Интервал $[r_j, d_j)$ называют *доменом* работы j . Между некоторыми работами могут быть заданы *отношения предшествования*. В классической постановке из существования отношения предшествования $i \rightarrow j$ следует, что работа j может начать выполнение только после того, как работа i будет завершена. Будем говорить, что для данного множества работ задано *расписание*, если для каждой работы $j \in N$ задан момент начала обслуживания S_j . Расписание π является *допустимым*, если для любого $j \in N$ выполнено условие $S_j \in [r_j, d_j - p_j)$, и при этом ресурсные ограничения и отношения предшествования не нарушены на всем протяжении выполнения работ проекта. Для решения задачи требуется найти допустимое расписание с минимальным временем окончания выполнения проекта, или доказать, что таковых не существует.

В данной статье мы также рассматриваем обобщенную постановку, известную в литературе как RCPSP/max, когда для пар работ определены отношения предшествования с временными лагами. Если для работ $i, j \in N$ определено отношение предшествования с временным лагом e_{ij} , то моменты начала выполнения требований удовлетворяют неравенству $S_i + e_{ij} \leq S_j$. В классической постановке отношения предшествования $i \rightarrow j$ соответствует временной лаг $e_{ij} = p_i$. Если все временные лаги неотрицательны, то отношения предшествования образуют ациклический орграф. В данной статье рассматривается постановка задачи с неотрицательными временными лагами.

Уточнение временных лагов с использованием критических путей. Пусть есть три требования $i, j, k \in N$, для которых определены отношения предшествования e_{ij} и e_{jk} . Тогда из системы неравенств

$$\begin{cases} S_i + e_{ij} \leq S_j, \\ S_j + e_{jk} \leq S_k \end{cases}$$

следует $S_i + e_{ij} + e_{jk} \leq S_k$, т.е. для пары работ $i, k \in N$ может быть определено отношение предшествование с временным лагом $e'_{ik} = e_{ij} + e_{jk}$. Если же отношение предшествования между работами i и k уже задано, но его временной лаг e_{ik} меньше, чем полученное значение e'_{ik} , то его можно уточнить, присвоив значение $e_{ik} := e'_{ik}$. Рассмотрим взвешенный орграф отношений предшествования, где вершинами являются работы, а каждому из ребер будет соответствовать величина, равная временному лагу. Тогда пусть P_{ij} – множество путей из вершины i в вершину j . Для каждого пути h может быть определена его длина l_h – сумма весов принадлежащих ему ребер. Тогда будет верно следующее утверждение:

$$S_i + \max_{h \in P_{ij}} l_h \leq S_j.$$

Временные лаги отношений предшествования могут быть уточнены с помощью нахождения путей максимальной длины с использованием алгоритма Флойда–Уоршелла [13, 14].

Использование отношений предшествования для уточнения доменов работ. Пусть есть два требования $i, j \in N$, для которых задано отношение предшествования с временным лагом e_{ij} . Тогда из условий:

$$\begin{cases} S_i \in [r_i, d_i - p_i), \\ S_j \in [r_j, d_j - p_j), \\ S_i + e_{ij} \leq S_j \end{cases}$$

могут быть получены следующие неравенства:

1) $S_j \geq r_i + e_{ij}$ – из данного неравенства следует, что работа j не может начать выполнение раньше момента времени $r_i + e_{ij}$, что позволяет уточнить домен работы j , присвоив: $r_j := \max\{r_j, r_i + e_{ij}\}$;

2) $S_i < d_j - p_j - e_{ij}$ – из данного неравенства следует, что работа i должна начать выполнение до момента времени $d_j - p_j - e_{ij}$, откуда следует, что окончить свое выполнение оно должно до момента $d_j - p_j - e_{ij} + p_i$. Присвоение $d_i := \min\{d_i, d_j - p_j - e_{ij} + p_i\}$ уточняет директивный срок работы, и в некоторых случаях сокращает ее домен;

3) $S_j - S_i \geq r_j - d_i + p_i$ – данное неравенство позволяет уточнить временной лаг отношения предшествования, выполнив присвоение $e_{ij} = \max\{e_{ij}, r_j - d_i + p_i\}$. Для получения данного неравенства требуются только домены переменных работ, и в случае, если отношение предшествования между работами i и j не определено, оно может быть вычислено по формуле $e_{ij} = r_j - d_i + p_i$.

Согласование доменов выполнения работ и отношений предшествования. Будем говорить, что отношения предшествования и домены выполнения работ *согласованы*, если для любых работ $i, j \in N$ определены отношения предшествований с временными лагами e_{ij} и e_{ji} и верны неравенства:

$$\begin{aligned} r_j &\geq r_i + e_{ij}, \\ d_i &\leq d_j - p_j - e_{ij} + p_i, \\ e_{ij} &\geq r_j - d_i + p_i. \end{aligned}$$

В этом случае домены переменных не могут быть уточнены с помощью отношений предшествований и наоборот.

Ниже предложен алгоритм согласования примера задачи RCPSP/max.

Алгоритм 1.

1. Для множества работ N строится ориентированный подграф отношений предшествования.

2. Выполняется уточнение временных лагов с помощью алгоритма Флойда–Уоршелла.

3. Формируется множество работ (вершин) A , у которых моменты поступления не могут быть увеличены с использованием временных лагов. При добавлении очередной вершины i выполняем следующие операции:

а) рассматривается множество вершин, не имеющих предшественников среди множества $N \setminus A$. Выбирается вершина i с наименьшим моментом поступления и добавляется во множество A ;

б) для всех пар i, j , где $j \in N \setminus A$, для которых определены значения e_{ij} , выполняется присвоение $r_j := \max\{r_j, r_i + e_{ij}\}$.

Данная процедура повторяется до момента $A \equiv N$.

4. Формируется множество работ (вершин) B , у которых директивные сроки не могут быть уменьшены с использованием временных лагов. При добавлении очередной вершины i выполняем следующие операции:

а) рассматривается множество вершин, не имеющих последователей среди множества $N \setminus B$. Выбирается вершина i с наибольшим директивным сроком и добавляется во множество B ;

б) для всех пар i, j , где $j \in N \setminus B$, для которых определены значения e_{ji} , выполняется присвоение $d_j := \min\{d_j, d_i - p_i - e_{ji} + p_j\}$.

Данная процедура повторяется до момента $B \equiv N$.

5. Для всех пар работ $i, j \in N$ выполняется уточнение временного лага с использованием домена, т.е. присвоение $e_{ij} = \max\{e_{ij}, r_j - d_i + p_i\}$, если величина e_{ij} определена и $e_{ij} = r_j - d_i + p_i$, если не определена и при этом верно неравенство $r_j - d_i + p_i > 0$.

6. Выполняется повторное уточнение временных лагов с помощью алгоритма Флойда–Уоршелла.

Теорема. Алгоритм 1 выполняет согласование доменов выполнения работ с отношениями предшествования за $O(n^3)$ операций.

Заключение. Рассмотрена задача RCPSP в классической постановке и в расширенной постановке RCPSP/max, в которой определены отношения предшествования с временными лагами. Представлены неравенства, отражающие взаимосвязь между отношениями предшествования и областью допустимых моментов начала обслуживания требований. Предложен полиномиальный алгоритм согласования отношений предшествования с моментами поступления и директивными сроками выполняемых работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00295 мол_а.

Список использованных источников

1. Garey M., Johnson D. Complexity results for multiprocessor scheduling under resource constraints, SIAM Journal on Computing, 1975, 4, 397 – 411.
2. Kolish R., Padman R. An Integrated Survey of Project Scheduling, in Manuscripteaus den Institut fur Betriebswirtschaftslehre, Kiel, 1997.
3. Weglarz J. (Ed.) Project Scheduling, Springer US, 1999.
4. Hartmann S., Kolisch R. Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project scheduling problem, European Journal of Operational Research, Elsevier BV, 2000, 127, 394 – 407.
5. Kolisch R., Hartmann S. Heuristic Algorithms for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analysis, Project Scheduling, Springer US, 1999, 147 – 178.
6. Hillier F. S. (Ed.) Project Scheduling, Kluwer Academic Publishers, 2002.
7. Schwindt C., Zimmermann J. (Eds.) Handbook on Project Management and Scheduling, Springer International Publishing, 2015.
8. Kone O., Artigues C., Lopez P., Mongeau M. Event-based MILP models for resource-constrained project scheduling problems, Computers & Operations Research, Elsevier BV, 2011, 38, 3 – 13.
9. Artigues C., Kone O., P. Lopez Mongeau, M. Mixed-Integer Linear Programming Formulations, Handbook on Project Management and Scheduling V. 1, Springer International Publishing, 2014, 17 – 41.
10. Baptiste P., Pape C. L., Nuijten W. Constraint-Based Scheduling, Kluwer Academic Publisher, 2001.
11. Laborie P. Algorithms for propagation of resource constraints in AI planning and scheduling: Existing approaches and new results, Artificial Intelligence, 2003, 143, 151 – 188.

12. Vilim P. Global Constraints in Scheduling, Phd. Thesis, Charles University in Prague, Faculty of Mathematics, Physics, Department of Theoretical Computer Science, and Mathematical Logic, Charles University in Prague, Faculty of Mathematics, Physics, Department of Theoretical Computer Science, and Mathematical Logic, 2007.

13. Floyd R. W. Algorithm 97: Shortest Path, Communications of the ACM, 1962, 5 (6), 345.

14. Warshall S. A theorem on Boolean matrices, Journal of the ACM, 1962, 9 (1), 11–12.

Я. А. Елфимова

(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

ЛОГИСТИКА В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ. УПРАВЛЕНИЕ ЗАТРАТАМИ В ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Аннотация. Описаны логистические затраты, их классификация и современные методы учета затрат в логистической системе. Итогом статьи являются рекомендации по управлению затратами и их минимизации, которых необходимо придерживаться независимо от выбранного метода решения поставленной оптимизационной задачи.

Ya. A. Elfimova

(Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia)

LOGISTICS IN CONSTRUCTION PRODUCTION. COST MANAGEMENT IN LOGISTICS SYSTEMS

Abstract. The article describes the logistics costs, their classification and modern methods of cost accounting in the logistics system. The result of the article are recommendations for managing costs and minimizing them, which must be followed regardless of the chosen method of solving the optimization problem.

На сегодняшний день проблемами логистики занимается большое количество исследователей во многих отраслях. Различного рода компании, организации, предприятия пытаются применить логистику к своей сфере, особенно это актуально для строительного производства. Любой кратковременный простой на стройке может привести к экономическим потерям. Чтобы избежать потерь времени, добиться четкой поставки материалов, необходимо использование логистики. Хороший логист, к примеру, транспортный, сможет выбрать правильное время суток для перевозки материалов и сырья, рассчитать оптимальный маршрут, в результате чего доставка будет произведена вовремя,

а также будет получена экономическая выгода в виде экономии затрат на топливо.

Акцентированного внимания заслуживает проблема минимизации логистических издержек. Управление издержками на любом предприятии является средством достижения высоких экономических результатов.

Управление затратами в логистических системах должно быть направлено на решение ряда задач:

- 1) оптимизация логистического пути;
- 2) определение зависимости рентабельности производства от величины затрат;
- 3) увеличение прибыли и улучшение функционирования логистической системы в целом.

Исходя из перечисленных задач управления логистическими затратами, очевидна необходимость в формировании эффективного механизма, который мог бы оптимизировать величину данных затрат.

Логистические затраты составляют наиболее значимую статью затрат, превосходят их только затраты на сырье и материалы и себестоимость готовой продукции.

Расходы в логистической системе делятся на следующие составляющие: расходы на транспорт, расходы на хранение материалов и расходы на содержание запасов. В таблице 1 приведены затраты на логистику на предприятиях строительного производства в процентах у разных стран [10].

1. Состав логистических затрат в строительстве по странам, %

Страна	Транспортные расходы	Расходы на хранение	Расходы на содержание запасов
Великобритания	41	35	24
США	46	35	19
Средняя Европа	50	22	28
РФ	35	38	27

Из данных табл. 1 видно, что большую долю логистических затрат составляют транспортные расходы. В Британии это 41% от общих расходов логистической системы, в США – 46%, в странах средней Европы – 50% [10]. Говоря о Российской Федерации, часть транспортных расходов в логистических издержках составляет около 35% [10].

Любое предприятие, не только строительной сферы, старается снизить расходы на содержание запасов, так как на хранение запасов используется около 25% балансовой стоимости в год. В России эта тенденция наблюдается с 1990 г., и доля затрат на хранение запасов снизилась с 48 до 21% [10].

Для дальнейшего анализа существующих методов учета логистических затрат следует дать определение понятию «логистические затраты» и рассмотреть их классификацию.

Логистические затраты – это совокупность расходов на применение рабочей силы, средств и орудий трудовой деятельности, решение негативных последствий непредвиденных ситуаций, денежные затраты, которые возникают при выполнении всех логистических операций (от размещения заказов до отгрузки готовой продукции, а также при поддержании запасов предприятия).

На базе данного определения выделим признаки классификации логистических затрат:

- 1) по видам логистических операций;
- 2) по месту возникновения;
- 3) по этапам потокового процесса;
- 4) по видам затрат.

2. Классификация логистических издержек

Признак	Классификация
По видам логистических операций:	– затраты на реализацию программы маркетинга; – затраты на информационное обеспечение; – затраты на поддержание собственных запасов
По месту возникновения:	– производственные затраты; – обслуживающие затраты
По этапам потокового процесса:	– затраты на закупку; – затраты на производство; – затраты на транспортировку
По видам затрат:	– прямые и косвенные; – постоянные, переменные и смешанные

На сегодняшний момент известны следующие методы учета логистических затрат:

1) *standartcosting* – данный метод помогает анализировать затраты на практике – проводится анализ фактической себестоимости от нормативной на основе факторного анализа;

2) *directcosting* – используется для исчисления «чистой» себестоимости продукции – базируется на разделении постоянных и переменных расходов, прямых и косвенных;

3) *absorptioncosting* – метод основывается на объединении всех прямых производственных затрат и косвенных и их включении в себестоимость продукции. Большим преимуществом данного метода является его способность влиять на финансовый результат.

Так же в литературе часто упоминаются и другие методы, такие как *activitybasedcosting* (АВС) – метод более точного описания затрат, в его основе лежит *принцип Парето* – 20% всех товаров дают 80% оборота.

Just-in-time (ЖТ) – главным принципом данного метода является отказ от крупнопартийного производства продукции, замена его на предметное производство. Другими словами, предприятие производит продукцию только тогда, когда она необходима. Преимуществами данного метода являются минимизация или в конце концов ликвидация незавершенного производства, сведение к минимуму запасов.

Таким образом, приведем некоторые рекомендации по минимизации логистических затрат.

1. Поиск более бюджетных заменителей ресурсов.
2. Вклад инвестиций в самые затратные звенья логистической цепи.
3. Эффективное распределение и использование ресурсов, а также оптимальное управление факторами, влияющими на рост затрат.
4. Компенсация роста затрат в одном звене логистической цепи с помощью сокращения затрат в другом звене.
5. Увеличить производительность труда сотрудников.
6. Проведение переговоров с поставщиками и покупателями насчет снижения цен и надбавок.
7. Повысить координацию деятельности с поставщиками и потребителями.

Заключение. В данной статье уточнено определение логистических затрат с уклоном на их четкое разделение, исходя из которого были выделены признаки деления логистических затрат, проанализированы и обобщены существующие классификации и представлена собственная. Четкое деление затрат по сферам деятельности предприятия и их учет способствуют повышению эффективности логистического управления предприятия в целом.

Список использованных источников

1. Бродецкий, Г. Л. Системный анализ в логистике. Выбор в условиях неопределенности / Г. Л. Бродецкий. – М. : Academia, 2016. – 336 с.
2. Горских, О. А. Особенности управления логистическими затратами промышленного предприятия / О. А. Горских, А. В. Селиванов. – СПб. : Санкт-Петерб. гос. инж.-эконом. ун-т. – 2012. – С. 80–81.
3. Логистика и управление цепями поставок : учебник. – М. : Юрайт, 2015. – 592 с.

4. Лукинский, В. С. Логистика и управление цепями поставок / В. С. Лукинский, В. В. Лукинский, Н. Г. Плетнева. – М. : Юрайт, 2016. – 360 с.
5. Канке, А. А. Основы логистики : учеб. пособие / А. А. Канке, И. П. Кошечая. – М. : КНОРУС, 2010. – 576 с.
6. Панкова, Е. А. вопросу о понятии «Логистические затраты» / Е. А. Панкова, Н. В. Широченко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2013. – Т. 2, № 9. – С. 197–198.
7. Просветов, Г. И. Математические методы в логистике. Задачи и решения / Г. И. Просветов. – М. : Альфа-пресс, 2017. – 304 с.
8. Селиванов, А. В. Экономическая оценка воздействия логистических затрат на себестоимость и прибыль предприятия / А. В. Селиванов, О. Я. Вердникова, А. С. Бутусин // Логистические системы в глобальной экономике. – 2013. – № 3-1. – С. 206 – 210.
9. Белозерцева, Н. П. Методы оптимизации логистических затрат / Н. П. Белозерцева, А. В. Локша, Н. И. Петрова // Азимут научных исследований: экономика и управление. – 2017. – № 4. – С. 50 – 53.
10. Плетнева, Н. Г. Развитие логистики в строительстве: особенности, перспективы, методы принятия решений / Н. Г. Плетнева, Н. В. Власова // Lobanov-logist.ru. – 2014.

М. А. Красных, О. Н. Точеная

(Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия)

ЭФФЕКТ ОТ ВНЕДРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫМИ ИНТЕРВАЛАМИ НА СКЛАДЕ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Аннотация. Представлены преимущества системы TSM. Рассмотрены различные практики и полученные результаты от внедрения данной системы. Проведено картирование склада металлопродукции, выявлены узкие места и предложены пути их решения, также схематично представлена карта процесса.

M. A. Krasnykh, O. N. Tochenaya

(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

EFFECT OF THE IMPLEMENTATION THE INFORMATION SYSTEM OF MANAGEMENT OF TEMPORARY INTERVALS IN THE WAREHOUSE OF METAL PRODUCTS

Abstract. This article presents the advantages of the TSM system. Consideration of the practice of applying this system and the results. Mapping of the rock of metal products was carried out, bottlenecks were identified and ways to solve them were proposed, and a map of the process was schematically presented.

Внедрение современных цифровых технологий в практику ведения транспортно-логистического бизнеса приводит к изменению бизнес-моделей и стратегического планирования; улучшает взаимодействие между всеми участниками перевозочного процесса; повышает производительность.

Крупнейшим в России и одним из самых эффективных в мире производителей стальной продукции является Группа Компаний НЛМК, продукция которой используется в более чем 70 странах мира в различных отраслях. Более 20 предприятий Группы НЛМК объединены в единую производственную цепочку и расположены в России, Бельгии, Дании, Италии, Франции, США и Индии. Поэтому одним из главных факторов повышения эффективности можно считать изменения в логистических системах.

На рынке логистических ИТ-решений значимым элементом является управление временными интервалами поставок или TSM (Time Slot Management System). Данная система помогает устранить узкие места в цепи поставок и повысить эффективность управления складской логистикой [2].

Склады металлопроката представляют собой закрытые и открытые помещения, состоящие из многочисленных взаимосвязанных элементов, имеющие определенную структуру и выполняющие ряд функций по преобразованию материальных потоков, а также накоплению, переработке и распределению грузов между потребителями.

Рассмотрим функционирование одного из складов металлопродукции ГК НЛМК. Металлопрокат доставляется на склад путем железнодорожного сообщения, продукцию оприходуют и складировать в зависимости от условий хранения. В дальнейшем металл грузят в автотранспорт и доставляют до конечного потребителя.

Для выявления узких мест в работе склада было проведено картирование процесса, определены следующие проблемы (рис. 1):

- 1) длительное ожидание оформления документов для въезда на территорию склада;
- 2) формирование очереди из автомобилей для осуществления погрузки продукции;
- 3) скопление автотранспорта перед контрольно-пропускным пунктом на выезде с территории склада.

В свою очередь совокупность этих проблем приводит к уменьшению производительности склада и увеличению времени доставки продукции, получению штрафов за простои автотранспорта и возможные риски потери имиджа компании на рынке. Внедрение системы TSM позволит решить данные проблемы.

Благодаря TSM товар поступает в нужном количестве, в нужное время и в нужное место. Данная система помогает планировать приоритетность поставок автотранспортом, управлять очередностью прибытия автомобилей для

погрузки/разгрузки, управлять запасами на складе, а также оптимизировать деятельность работников склада и погрузочных площадок [3]. Решение также позволит сократить время простоев автомобилей и избавит от хаотичного скопления автотранспорта и лишних передвижений на складском дворе.



Рис. 1. Текущее состояние склада металлопродукции ГК НЛМК

Основное отличие TSM-системы от стандартных систем YMS (Yard Management System) заключается в том, что к TSM, помимо внутренних сотрудников предприятия, имеют доступ перевозчики и поставщики, и они сами в рамках заданных параметров работы склада могут выбирать и резервировать удобное для них время прибытия, с указанием характеристик автомобиля. На основании пожеланий перевозчиков формируется очередность прибытия [1]. TSM динамически реагирует на корректировки и перестраивает график, а также уведомляет участников поставки об изменениях.

Отслеживание процессов вручную может внести ошибки в цепь поставок, что создаст проблемы для всех участников поставки. TSM-система автоматически генерирует информацию и предоставляет ее в едином виде ответственным работникам, находящимся на разных звеньях процесса, тем самым устраняя возможные сбои.

Одним из примеров внедрения TSM является компания ArcelorMittal, «АрселорМиттал» – крупнейшая металлургическая компания в мире. Имеет производственные мощности в 18 странах на 4 континентах, продукция реализуется в 160 странах.

Узкие места в логистической цепи поставок данной компании были следующие:

- неконтролируемые поставки лома;
- проблемы с исходящими потоками грузов в точках отгрузки, срывы сроков доставки, снижение уровня безопасности;
- сложность обработки претензий;

- сложности при разгрузке товаров на складе;
- непрогнозируемые пиковые часы.

TSM позволило компании:

- автоматизировать процесс обеспечения транспортом;
- автоматизировать назначение транспорта на основании заранее заданных критериев;
- создать электронное расписание для выбора оптимального времени отгрузки грузов;
- применить возможность резервации собственных временных окон в системе под самовывоз;
- автоматическое создание отчетов, касающихся соблюдения сроков, простоев и времени обратного рейса;
- описать и резервировать в системе временных окон различной длительности, возможность их объединения;
- интегрировать все типы транспорта: прибывающего или отправляющегося, межзаводского.

Таким образом, компания получила следующие результаты. Эффективную работу перевозчиков: упрощенное планирование, ускорение цикла перевозки до 50%, сокращение времени простоев до 30%. Сокращение расходов: снижение расходов на 10%, сокращение количества сотрудников, задействованных в процедурах погрузки/разгрузки товара. Операционный контроль: контракты на покупку лома, стандартизация процесса обработки претензий, повышение качества и безопасности.

Таким образом, применяя бенчмаркинг, спрогнозируем изменения функционирования процесса на складе металлопродукции ГК НЛМК (рис. 2).

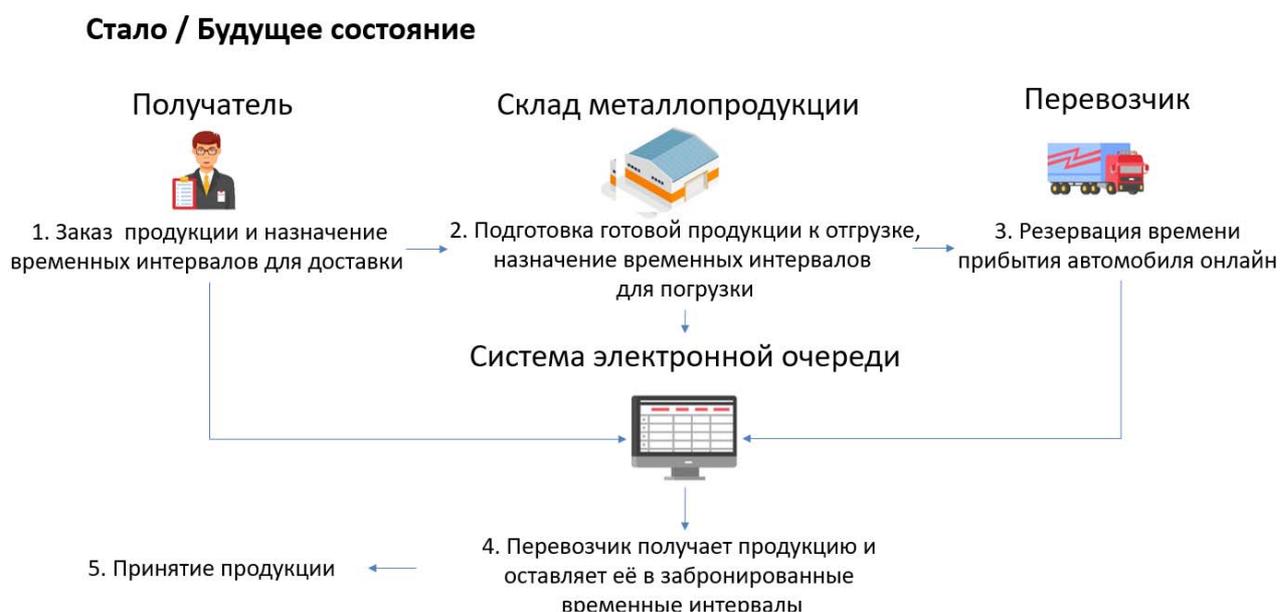


Рис. 2. Будущее состояние склада металлопродукции ГК НЛМК после применения TSM-системы

Использование TSM-системы оптимизирует процесс поставки в целом и дополняет функционал систем для управления транспортной логистикой. TSM-системы обеспечивают полный контроль над процессом прибытия/убытия и погрузки/разгрузки автомобилей, а также дают контроль над ресурсами.

TSM-решения смогут повысить прозрачность складских и погрузочно-разгрузочных операций, и у предприятия появятся новые возможности для оптимизации своей цепи поставок.

Список использованных источников

1. Умный контейнер, умный порт, ВІМ, Интернет вещей и блокчейн в цифровой системе мировой торговли / Ю. В. Куприяновская, В. П. Куприяновский, А. А. Климов и др. // International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – V. 6, № 3. – С. 49 – 94.

2. Курганов, В. М. Логистика. Транспорт и склад в цепи поставок товаров / В. М. Курганов. – М. : Книжный мир, 2013. – 512 с.

3. Мирошниченко, М. А. Применение контроллинга в логистических системах организации / М. А. Мирошниченко, О. К. Дуплякина // Научный журнал КубГАУ. – 2015. – № 108(04). – С. 11 – 13.

Е. С. Гуськова, С. Л. Блюмин

(Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Аннотация. Рассматриваются методы решения задач дискретной оптимизации в многокритериальной среде, когда каждый показатель влияет на решение в целом. Сложность поставленной задачи заключается в исключении заведомо неактуальных решений, тем самым сокращается и размерность задачи.

E. S. Gus'kova, S. L. Blyumin

(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

SOLUTION OF THE DISCRETE OPTIMIZATION PROBLEM IN A MULTIPLE-CRITERIA SYSTEM

Abstract. The article discusses methods for solving discrete optimization problems in a multi-criteria environment, when each indicator affects the solution as a whole. The complexity of the task lies in the exclusion of obviously irrelevant solutions, thereby reducing the dimension of the problem.

Оптимизационные задачи с несколькими критериями [3] имеют вид:

$$\begin{aligned} \max \{f_1(x) = z_1\}, \\ \max \{f_2(x) = z_2\}, \\ \vdots \\ \max \{f_n(x) = z_n\}, \end{aligned}$$

при условии, что $x \in S$, где $f(x)$ – критерий оптимизации, а S – множество допустимых значений переменной. Идеальным случаем будет являться ситуация, когда существует точка из множества S , максимизирующая все n критерии, в этом случае она и будет являться решением задачи. Если такой точки нет, то для нахождения решения используются приемы из области многокритериальной оптимизации, о них и пойдет речь дальше в этой статье. Отметим, что помимо задачи максимизации, с тем же успехом можно сформулировать и задачу минимизации.

Обозначим все множество возможных решений как S . Нашей задачей является выбор среди них некоторого набора решений, являющихся с точки зрения наших целей оптимальными. Обозначим решение задачи выбора (множество выбираемых решений) как $Sel S$ [1].

Для того, чтобы сравнивать решения друг с другом, необходимо задать на S некоторое отношение предпочтения \succ_S . Это отношение предпочтения задается на парах возможных решений и представляет собой некоторое бинарное отношение, т.е. подмножество Декартова произведения $S \times S$. Его значение заключается в том, что два решения s' и s'' связаны отношением предпочтения, если лицо, принимающее решения (ЛПР), при выборе между ними выбирает первое из них. В этом случае пишут:

$$s' \succ_S s''.$$

Отношение предпочтения \succ_S , которым ЛПР руководствуется в процессе выбора, представляет собой строгий порядок, т.е. является иррефлексивным и транзитивным. Из этого требования легко сделать вывод, что отношение \succ_S является антисимметричным.

Рассмотрим прикладную задачу: пусть имеется некоторый набор исходного материала прямоугольной формы (рулоны), на каждом из которых необходимо разместить набор заготовок (лент), к каждому рулону привязан свой набор лент, при этом осуществлять порядок размещения внутри рулона можно, перегруппировывать ленты нельзя. Набор лент здесь и далее будем обозначать как заказ, количество заказов должно превышать количество рулонов.

Введем следующие обозначения: n – количество заказов, $j = 1, \dots, n$ – номер заказа, m – количество рулонов, $i = 1, \dots, m$ – номер рулона.

Поскольку число заказов n превосходит число рулонов m , все решения будут представлять собой упорядоченный набор $\langle s_1, s_2, \dots, s_m \rangle$ заказов, где s_i –

номер заказа, размещенного на i -м рулоне. Такой упорядоченный набор называется размещением, из комбинаторики известно, что общее число размещений равно $A_n^m = \frac{n!}{(n-m)!}$.

Решение задачи размещения заказов по рулонам может быть охарактеризовано несколькими функциональными показателями, которые в теории многокритериальных задач называются критериями качества. А именно, введем функцию $D(i, j)$, обозначающую наименьший возможный (при варьировании отступа) процент несоответствия при размещении заказа j на рулоне i ; тогда качество каждого решения можно охарактеризовать m числами d_1, \dots, d_m , где $d_i = D(i, s_i)$. Назовем такой набор вектором качества решения, а множество всех возможных векторов качества назовем множеством возможных векторов. Функцию, которая переводит решение в соответствующий вектор качества, назовем $\bar{d}(s)$,

$$\bar{d}(s) = (D(1, s_1), \dots, D(m, s_m)).$$

При прочих равных условиях ЛПР заинтересовано в получении по возможности меньших значений каждого компонента вектора качества. Эту заинтересованность можно выразить в терминах так называемой аксиомы Парето.

Аксиома Парето (в терминах решений). Для всех пар решений $s', s'' \in S$, для которых имеют место неравенства $d_i(s') \leq d_i(s''), i = 1, 2, \dots, m$, при этом $\bar{d}(s') \neq \bar{d}(s'')$, выполняется соотношение $s' \succ_s s''$.

Соотношения $d_i(s') \leq d_i(s''), i = 1, 2, \dots, m$, и $\bar{d}(s') \neq \bar{d}(s'')$ означают, что решение s' доминирует по Парето решение s'' . Исключение всех решений, доминируемых каким-либо другими решениями по Парето, приводит к множеству парето-оптимальных решений, которое обозначается $P_d(S)$ и определяется равенством

$$P_d(S) = \{s^* \in S \mid \text{не существует такого } s \in S, \text{ что } d_i(s) \leq d_i(s^*) \text{ и } \bar{d} \neq \bar{d}(s^*)\}.$$

При выполнении аксиомы Парето множество недоминируемых решений $Ndom S$ удовлетворяет включению

$$Ndom S \subset P_j(S),$$

откуда следует так называемый принцип Эджворта–Парето, согласно которому

$$Sel S \subset P_j(S),$$

т.е., если ЛПР ведет себя достаточно «разумно», то выбираемые им решения обязательно являются парето-оптимальными.

Таким образом, некоторые из полученных A_n^m решений можно исключить априорно, если они не являются парето-оптимальными. Кроме того, исходя из того, что каких-либо предпочтений к рулонам у нас нет, можно считать одинаково ценными решения, векторы качества которых совпадают с точно-

стью до перестановки. Исходя из этого, тест на доминируемость по Парето можно улучшить и сравнивать сразу не сами вектора качества, а «упорядоченные» векторы качества \bar{d}' , каждый из которых представляет собой вектор \bar{d} , компоненты которого упорядочены по возрастанию (убыванию), и исключать решения, для которых найдется другое решение с вектором \bar{q}' , доминирующим по Парето вектор \bar{d}' .

Априори, однако, неизвестно, сколько решений удастся исключить с помощью теста на доминируемость по Парето. Таких решений может и не быть, т.е. множество $P_j(S)$ может совпадать со всем множеством решений. Оставшиеся решения необходимо сравнивать с помощью какой-либо агрегирующей функции $f(\bar{d})$, которая должна быть неубывающей по каждому аргументу и быть симметричной относительно их перестановки, т.е.

$$f(d_1, \dots, d_i, \dots, d_j, \dots, d_m) = f(d_1, \dots, d_j, \dots, d_i, \dots, d_m).$$

В качестве такой функции может, выступать, например, какая-либо из норм вектора \bar{d} ; например, сумма всех процентов несоответствия (первая Гельдерова норма, или манхэттенское расстояние): $\sum_{i=1}^m d_i$.

Евклидова норма: $\sqrt{\sum_{i=1}^m d_i^2}$;

бесконечная Гельдерова норма: $\max_{1 \leq i \leq m} d_i$.

Перечисленные нормы являются непрерывными функциями вектора \bar{d} , но можно рассматривать и функции, не являющиеся непрерывными. Например, если задан некий предельно допустимый процент несоответствия α , то для заказчика будет важно то, сколько заказов можно разместить на рулонах так, чтобы этот процент не был превышен. Соответствующую агрегирующую функцию можно записать как

$$|\{d_i: d_i > \alpha\}|.$$

Данный перечень не является исчерпывающим. Выбор конкретной агрегирующей функции определяется предпочтениями заказчика.

С учетом вышесказанного можно предложить следующий алгоритм по нахождению оптимального решения.

1. Вычисляем $n \cdot m$ чисел – наилучшие проценты несоответствия при расположении различных заказов на различных рулонах. Вычисления проводим с помощью любого алгоритма дискретной оптимизации (в том числе генетического алгоритма, алгоритма имитации отжига [2] и т.д.).

2. Перенумеровываем все A_n^m размещений.

3. Выбираем агрегирующую функцию (на следующем этапе эта функция будет выступать в качестве функции приспособленности).

4. Минимизируем значение этой функции на множестве наших размещений с помощью любого алгоритма дискретной оптимизации (в том числе

генетического алгоритма, алгоритма имитации отжига и т.д.). Оптимизация получается одномерная, есть всего один варьируемый параметр – номер размещения.

Список использованных источников

1. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В. Д. Ногин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 114 с.
2. Курейчик, В. В. Теория эволюционных вычислений / В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, С. И. Родзин. – М. : Физматлит, 2012. – 260 с.
3. Штойер, Р. Многокритериальная оптимизация. Теория вычислений и приложений / Р. Штойер ; пер. с англ. – М. : Радио и Связь, 1992. – 504 с.

А. Л. Ухин

(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

Аннотация. Рассматривается объектный подход к моделированию задачи оптимального планирования учебного процесса, который позволяет уменьшить размерность задачи и разработать эффективные алгоритмы ее решения. Содержится описание одного из алгоритмов с учетом возможного использования дополнительных критериев эффективности, повышающих качество решения.

A. L. Ukhin

(Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia)

MODELS AND ALGORITHMS OF OPTIMAL PLANNING OF EDUCATIONAL PROCESS

Abstract. The article deals with the object approach to modeling the problem of optimal planning of the educational process, which allows to reduce the dimension of the problem and develop effective algorithms for its solution. The article contains a description of one of the algorithms, taking into account the possible use of additional efficiency criteria that improve the quality of the solution.

В настоящее время учебные заведения стали полноправными субъектами рыночной экономики, имеющими право самостоятельно определять направления своего развития, цели и методы их достижения. Повышаются требования общества к качеству образования, радикально обновляются технологии обучения, усиливается конкуренция на рынке образовательных услуг. Появились

различные группы клиентов и потребителей образовательных услуг с их финансовыми возможностями, потребностями и интересами.

Тем не менее, в настоящее время в большинстве образовательных учреждений планирование образовательного процесса, в том числе и распределение ресурсов, осуществляется «вручную», отсутствует возможность многомерного анализа способов реализации образовательного процесса. Результаты планирования учебного процесса значительно ухудшаются с укрупнением образовательной организации и увеличением объема информации. Процесс поиска оптимальных или просто приемлемых, в любом смысле, управленческих решений в этих условиях носит интуитивный характер и осуществляется методом «проб и ошибок», что зачастую приводит не только к значительным материальным потерям, но и к потере качества подготовки обучающихся. Кроме того, при разработке управленческих решений не учитываются существующие экономические показатели эффективности образовательного процесса. Внедрение информационных технологий в практику управления образовательными организациями позволило значительно повысить качество планирования учебного процесса, в том числе за счет решения оптимизационных задач на основе математических моделей [1].

За основу для моделирования предлагается выбрать объектный подход, предложенный в работе [2]. В качестве примера применения объектного подхода рассмотрим задачу составления учебного расписания.

В качестве основного элемента моделирования используется класс «предмет», объекты которого имеют следующие свойства: наименование предмета, учебная группа, в которой он преподается, ФИО преподавателя, номера учебных аудиторий, в которых должен преподаваться предмет (или указание на то, что для него нет специализированных аудиторий). Все объекты-предметы имеют уникальный ID-номер от 1 до n , а количество экземпляров каждого объекта, задействованного в нумерации, равно количеству часов в неделю данного предмета в соответствующей учебной группе. Расписание – это таблица, ячейки которой также пронумерованы особым образом. Предварительно фиксируется структура будущего расписания, т.е. указываются ячейки, которые не будут участвовать в построении расписания. Если структура расписания жестко фиксирована (т.е. количество ячеек, участвующих в расписании, точно равно количеству учебных часов в неделю в этой группе) – это обеспечит отсутствие «окон».

Далее для каждого объекта-предмета под номером k вводится в рассмотрение еще одно свойство: множество $I(k)$ номеров строк расписания, на которых может находиться данный предмет (в соответствии с учебным планом и пожеланиями преподавателя, который его ведет). Соответственно, могут быть сформированы множества $K_j(i)$ – номера предметов j -й учебной группы, которые могут быть стоять в i -й строке расписания.

Далее для каждого объекта-предмета под номером k вводится еще одно свойство: набор $I(k)$ номеров строк расписания, на которых может располагаться предмет (в соответствии с учебным планом и пожеланиями преподавателя, который его ведет). Соответственно, могут быть сформированы наборы $K_j(i)$ -номера предметов j -й учебной группы, которые могут находиться в i -й строке расписания.

1. Класс «предмет»

ID
 Название предмета
 Группа
 Преподаватель
 Аудитория
 Множество $I(\text{ID})$

Обозначим через Y матрицу размера $p \times q$, где $y_{ij} = k$, если в j -й учебной группе на i -й строке расписания находится объект-предмет с номером k , и $y_{ij} = 0$, если в j -й учебной группе i -я ячейка расписания пустая; здесь p – общее количество строк в таблице-расписании, q – общее количество учебных групп. Тогда j -й столбец матрицы Y – это вектор-расписание, соответствующее j -й учебной группе. Такая структура данных приводит к относительно приемлемой размерности получаемой задачи. Так, если расписание строится на 6 дней с максимальной нагрузкой 6 уроков в день для 4 – 11 классов, в каждом из которых по 4 параллели, то число переменных равно $6 \times 6 \times 32 = 1152$, что существенно меньше, чем при использовании других подходов к моделированию [4, 5], когда при тех же исходных данных число переменных может достигать 100 тысяч (и более).

Рассмотрим матрицу совместимости объектов-предметов S , которая вводится следующим образом: $S(k, r) = 0$, если предмет k совместим с предметом r , $S(k, r) = 1$ в противном случае. Предметы являются несовместимыми, если они используют общий ресурс (преподавателя или аудиторию). Такие предметы не могут находиться в расписании на одной строке (т.е. преподаваться одновременно). Несовместимость между предметами, проводимыми в одной учебной группе, можно не учитывать, так как в матрице Y они находятся в одном столбце, соответственно, автоматически не могут находиться на одной строке. В качестве целевой функции предлагается использовать суммарное количество несовместимых предметов в каждой строке:

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{l=j+1}^q S(y_{ij}, y_{il}) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Таким образом, матрица $Y = (y_{ij})$ хранит перестановку чисел от 1 до n – по числу объектов-предметов, участвующих в расписании, и содержит pq –

n нулевых элементов (стоящих на фиксированных местах и не участвующих в перестроении расписания). При этом равенство $y_{ij} = k$ может выполняться только в случае, если $k \in K_j(i)$.

Очевидно, что оптимальное значение функции (1) равно 0. Достижение этого предела является необходимым условием для получения допустимого расписания. Эта функция будет использоваться для вычисления критерия приспособленности генетического алгоритма, работающего с переменными y_{ij} . Алгоритм перестраивает матрицу $Y = (y_{ij})$ таким образом, что элементы матрицы будут менять положение только в пределах своего столбца. При скрещивании часть столбцов случайным образом берется из одного родителя, часть из другого. Таким образом, потомки всегда будут представлять допустимое решение. Мутация с некоторой вероятностью меняет местами элементы одного столбца; это случайно выбранные элементы (участвующие в расписании), обмен которыми также всегда дает допустимое решение. Оценка численности особей в популяции осуществляется с помощью целевой функции (1). Поскольку эта функция минимизируется, в качестве критерия отбора целесообразно использовать турнирный отбор.

Важной положительной характеристикой предлагаемого алгоритма является простое включение в рассмотрение дополнительных критериев эффективности, повышающих качество построения расписания. К ним можно отнести:

1. Возможность не фиксировать четко границы расписания. Для этого добавляется фиктивный объект с определенными свойствами, и в конце алгоритма ячейка с фиктивным объектом будет эквивалентна тем, которые не участвуют в расписании.

2. Распределение предметов (в день не может быть более двух уроков по одному предмету; если по какому-то предмету в один день есть два урока, то эти уроки должны стоять рядом). Для каждого варианта расписания вычисляется количество ситуаций, не соответствующих этим условиям. Полученное значение добавляется в качестве штрафа к целевой функции (1) с некоторым весовым коэффициентом.

3. Распределение нагрузки в течение учебной недели. В соответствии с требованиями СанПиН [6], каждый предмет имеет свою оценку сложности (например, математика – 8 баллов, физкультура – 1). При этом наибольшая учебная нагрузка (в баллах) должна приходиться на середину недели (среду и четверг), а последний учебный день (суббота) должен быть наименее загруженным. Физкультура должна быть первым или последним уроком (и еще несколько требований [6]).

Штрафы за нарушение этих условий также могут быть добавлены к целевой функции (1). Оптимальные значения дополнительных критериев равны нулю.

Список использованных источников

1. Бадеников, А. В. Формализация задачи составления расписания учебных занятий в вузе / А. В. Бадеников, В. С. Балакирев, А. Л. Истомин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутский государственный университет путей сообщений. – 2011. – № 1(29). – С. 15 – 21.
2. Каширина, И. Л. Моделирование и алгоритмизация задачи составления расписания учебных занятий / И. Л. Каширина, А. Л. Ухин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2015. – № 2. – С. 66 – 71.
3. Каширина, И. Л. Применение генетических алгоритмов для составления расписания учебных занятий / И. Л. Каширина, А. Л. Ухин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Управление строительством. – 2015. – № 2(7). – С. 229 – 235.
4. Азарнова, Т. В. Методы анализа и синтеза расписаний для специальных систем планирования / Т. В. Азарнова, А. Л. Ухин // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – Т. 61, № 3-1. – С. 100 – 105.
5. Пайкерс, В. Г. Методика составления расписания в образовательном учреждении / В. Г. Пайкерс. – М. : АРКТИ, 2001. – 112 с.
6. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных заведениях. Приложение № 3. (СанПиН 2.4.2.2821-10).

В. Е. Белоусов, С. А. Баркалов, К. А. Нижегородов
(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

РЕСУРСНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ В ЗАДАЧАХ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. Дается систематическое описание ресурсно-временного анализа для широкого класса требований, предъявляемых к процессам потребления ресурсов современного строительного производства. Ставится задача аппроксимации исходной ресурсной модели более простыми временными моделями при ограничении на их количество.

V. E. Belousov, S. A. Barkalov, K. A. Nizhegorodov
(Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia)

THE RESOURCE AND TIME ANALYSIS IN PROBLEMS OF SCHEDULING OF THE CONSTRUCTION ENTERPRISES

Abstract. In the present article the systematic description of the resource and time analysis for a wide class of requirements imposed to processes of consumption of resources of modern construction production is given. The task of approximation of initial resource model simpler temporary is set at restriction for their quantity.

Проблеме использования ресурсно-временного анализа в задачах организации современного строительного производства [1] для случая, когда требуется выбрать последовательности выполнения работ неделимыми ресурсами, посвящены статьи [2, 3]. В них продемонстрирован ряд способов преобразования ресурсной модели (РМ) для упрощения временного анализа и рассмотрены наиболее рациональные способы ветвления при назначении ресурсов, обладающих различными свойствами. Поэтому предлагается представить ресурсно-временной анализ как сочетание ресурсного анализа (т.е. проведения последовательности преобразований РМ, включая ветвление для частичного назначения ресурсов) и временного анализа (т.е. получения оценок для выбора наиболее перспективного узла для ветвления).

Будем предполагать, что даны два конечных множества X, Z , причем $X \neq \emptyset, X \cap Z \neq \emptyset$. Обозначим через Θ пространство функций размерности $|X| + |Z|$, определенных на множестве $X \cup Z$, а произвольную функцию $T \in \Theta$ будем считать планом. Каждый элемент x множества X интерпретируется как идентификатор события, которое может означать начало, окончание работ или их частей и т.д. Для плана T координата T_x представляет время наступления события x . Каждый элемент $z \in Z$ понимается как идентификатор ресурса с непрерывной шкалой интенсивностей. Число T_z , (темп) представляет величину, обратную интенсивности. Предполагается, что в процессе выполнения работы темп T_z не может быть изменен, хотя может быть выбран из данного диапазона $[l_z, L_z]$ на этапе планирования. Продолжительность работы (x, y) равна bTz , где b – объем потребления ресурса z на работе (x, y) . Если определен темп T_z использования ресурса, то автоматически определена и продолжительность работы, которая потребляет данный ресурс. Тогда план T представлен вектором размерности $|X| + |Z|$ с координатами $\{T_x\} x \in X \cup Z$.

Введем понятие ресурсной шкалы через систему неравенств (1):

$$\{l_z \leq T_z \leq L_z\}_{z \in Z}, \quad (1)$$

для планов T , где $\{l_z\}_{z \in Z}$ и $\{L_z\}_{z \in Z}$ – удовлетворяющие соотношениям $0 \leq l_z \leq L_z$.

Для временной модели (ВМ) S план T назовем S -допустимым, если он удовлетворяет всем входящим в S соотношениям вида (1). Множество всех S -допустимых планов формируется через $D(S)$. Решая многокритериальные задачи, получают планы, не только удовлетворяющие условию Парето, но и не улучшаемые ни по одному из критериев.

Ресурсной моделью (РМ) считаем конечную совокупность ВМ (2):

$$R = \{S_\alpha\}_{\alpha \in \sigma}, \quad (2)$$

где σ^* – конечное множество альтернатив по ресурсам.

Назовем R^* исходной ресурсной моделью, если

$$R^* = \{S^*_\alpha\}_{\alpha \in \sigma^*},$$

где σ^* – множество вариантов с полным назначением ресурсов.

Для РМ обозначим $D(R) = \bigcup_{\alpha \in \sigma} (S_\alpha)$. Планы $T \in D(R)$ будем считать

R -допустимыми. На ресурсной модели сложно поставить целый ряд задач календарного планирования. Примером оптимизационной задачи, которая решается при календарном планировании комплексов работ, является следующая задача: для ресурсной модели (РМ) R найти R -допустимый план, доставляющий оптимум некоторому векторному критерию Φ . Прямой анализ множества $D(R)$ часто не представляется возможным [6] из-за большого количества альтернатив по ресурсам, а возможно, и по интенсивностям их использования. Будем говорить, что РМ R' подчинена ресурсной модели R ($R' < R$), если $D(R') \subset D(R)$. При этом, если $D(R') \neq D(R)$, то модель R' будем считать более жесткой по сравнению с моделью R . Если же $D(R') = D(R)$, то модели R и R' будем называть эквивалентными.

Множество $D(R^*)$, где R^* – исходная модель, разбивается на конечное, но достаточно большое число подмножеств $D(S_\alpha^*)$, удовлетворяющих системам линейных неравенств. Используя некоторые свойства модели (например, частичное назначение ресурсов), можно R^* разбить на подмножества, у которых $D(R_1), \dots, D(R_k)$ будут такими, что $D(R^*)$ содержит все $D(R_i)$, и каждое $D(S_\alpha^*)$ входит в состав некоторого $D(R_i)$. Таким образом, R_i представляет собой РМ, промежуточную между исходной РМ и ВМ S_α^* . Множества R_i конструируются так, чтобы перспективность планов, входящих в $D(R_i)$, можно было с достаточной точностью оценить, например, на основании временного анализа R_i . При проведении этого анализа R_i заменяется менее жесткой или эквивалентной ВМ S . Такая замена может проводиться постепенно с помощью элементарных операций путем построения последовательности $R_i < R' < R'' < \dots < S$. Пусть даны линейная форма $f(T)$ и РМ R . Рассмотрим варианты вхождения формы $f(T)$ в $S_\alpha \in R$. В S_α может входить неравенство (формула 1), в которых присутствует $f(T)$. Заметим, что множество вхождений формы $f(T)$ в S_α может оказаться и пустым.

Рассмотрим способы перехода к более простым и в то же время эквивалентным РМ. Если для некоторого $z \in Z$ имеем $1z = Lz$, то (2) может быть заменена двумя неравенствами вида (формула 3):

$$\begin{cases} T_x - T_y \leq bL_z, \\ T_y - T_x \leq -bl_z, \end{cases} \quad (3)$$

что облегчает проведение временного анализа.

Пусть в ВМ S на работе (x, y) используются ресурсы z, z' . Тогда

$$T_x - T_y = b_1 T_z \quad \text{и} \quad T_x - T_y = b_2 T_{z'}.$$

Пусть, кроме того, ресурс z' используется на работе

$$(x', y'): T_{x'} - T_{y'} = b_3 T_{z'}.$$

Добавим равенство

$$T_x - T_y = b_4 T_z, \quad \text{где} \quad b_4 = b_1 b_3 / b_2.$$

Получим ВМ, эквивалентную S .

Пусть в ВМ на работе (x, y) используются ресурсы z, z' . Это означает, что

$$l \leq T_z \leq L, \quad l' \leq T_{z'} \leq L', \quad T_x - T_y = b T_z, \quad T_x - T_y = b' T_{z'}.$$

Целесообразно рассматривать пересечение темповых диапазонов. Вместо неравенства $l \leq T_z \leq L$ при работе с моделями следует взять неравенство:

$$\max \left\{ l, \frac{b'l}{b} \right\} \leq T_z \leq \min \left\{ L, \frac{b'L}{b} \right\}.$$

Аналогично для $T_{z'}$ получаем ВМ, эквивалентную исходной.

Пусть для $S_\alpha \in R$ при некотором $z \in Z$ имеет место строгое неравенство $l_z < L_z$. Рассмотрим $l \in (l_z, L_z)$ и заменим ВМ S_α на две ВМ S_α' и S_α'' , отличающиеся от S_α тем, что неравенство (1) при данном z в S_α' заменено на $l_z < T_z < l$, а в S_α'' – на $l < T_z < L_z$. Операция дробления позволяет получить РМ R' , эквивалентную модели R , в целях использования ее в дальнейшем при анализе по схеме ветвей и границ. В предельном случае мы получаем замену ВМ на бесконечное множество ОСМ S_α' с фиксированными темпами использования ресурсов, т.е. с равенствами $l_z = L_z$ и неравенствами (3).

Рассмотрим операцию перехода к переменному темпу. В ВМ S равенства (2) при фиксированном T_z заменяются на два неравенства (4):

$$\begin{cases} T_x - T_y \leq b L_z, \\ T_y - T_x \leq -b l_z. \end{cases} \quad (4)$$

Если бы ресурс z обслуживал только одну работу (x, y) , то новая ВМ S' оказалась бы эквивалентной S , поскольку темп может быть произвольным. Но если работ, обслуживаемых ресурсом z , несколько, то неравенства (4) означают, что по каждой работе задается свой темп использования ресурса z . Тем самым мы переходим к менее жесткой ВМ. Удобство может состоять в том, что когда мы сделаем переменный темп для всех ресурсов, в ВМ не останется ни одного равенства типа (2), и она превратится в обобщенную сетевую модель (ОСМ), которая более удобна с точки зрения временного анализа.

Предположим, что имеется неделимый ресурс z , который обслуживает ряд работ или их частей $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, причем порядок их выполнения заранее не определен.

Пусть π – перестановка из n чисел $1, \dots, n$. Для того, чтобы потребовать выполнение работ в порядке (формула 5)

$$(x_{\pi_1}, y_{\pi_1}), \dots, (x_{\pi_n}, y_{\pi_n}), \quad (5)$$

достаточно задать ограничения транспортного типа (6)

$$T_{y_{\pi_1}} \leq T_{x_{\pi_2}}, T_{y_{\pi_2}} \leq T_{x_{\pi_3}}, \dots, T_{y_{\pi_{n-1}}} \leq T_{x_{\pi_n}}. \quad (6)$$

Число перестановок растет очень быстро при увеличении n . Поэтому возникает необходимость постепенного дробления множества перестановок при исследовании РМ для данного n . Сделать это можно косвенным путем при помощи последовательного включения неравенств (6).

Предположим, на первом шаге разбиваем $R = \{S_\alpha\}$ на два класса R' и R'' . К R' отнесем все S_α , для которых $T_{y_1} < T_{x_2}$, ко второму – все S_α , для которых $T_{y_2} < T_{x_1}$. Продолжая ветвление в классе R' , добавим к $T_{y_1} < T_{x_2}$ одно из неравенств $T_{y_1} < T_{x_3}$, или $T_{y_3} \leq T_{x_2}$. Если выбрано $T_{y_1} < T_{x_3}$, на следующем шаге рассмотрим неравенства $T_{y_2} < T_{x_3}$ или $T_{y_3} < T_{x_2}$. После выбора второго из этих неравенств неравенство $T_{y_1} < T_{x_2}$ становится лишним, и его можно отбросить.

Таким образом, в данной работе рассмотрены способы преобразования для аппроксимации задач организации строительного производства линейными и сетевыми задачами и доказано, что ветвление должно рассматриваться в тесном единстве с обратной операцией – агрегированием.

Список использованных источников

1. Бурков, В. Н. Механизмы функционирования организационных систем / В. Н. Бурков, В. В. Кондратьев. – М. : Наука, 1981.
2. Большие системы: моделирование организационных механизмов / В. Н. Бурков, Б. Данев, А. К. Еналеев и др. – М. : Наука, 1989. – 245 с.
3. Белоусов, В. Е. Алгоритм для оперативного определения состояний объектов в многоуровневых технических системах / В. Е. Белоусов, С. А. Кончаков // Экономика и менеджмент систем управления. – 2015. – № 3.2(17). – С. 227 – 232.
4. Аксененко, П. Ю. Алгоритм для анализа вариантов решений в многокритериальных задачах / П. Ю. Аксененко, В. Е. Белоусов, С. А. Кончаков // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 4(62). – С. 31 – 33.

В. Л. Порядина, Н. С. Косой
(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

МОДЕЛЬ ЦЕЛЕВОЙ КООРДИНАЦИИ ПРИ КОНКУРСНОМ УПРАВЛЕНИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ ПРОЕКТАМИ

Аннотация. Представлена вербальная модель целевой координации социально-экономических проектов, позволяющая административному органу на основе информации о текущем рассогласовании проектных циклов выработать координирующие воздействия на исполнителей. Найденные воздействия позволяют исполнителям найти управления своими проектными циклами, минимизируют отклонения общего процесса от заданного целевого состояния, и в то же время должны сохранять «оптимальность» управления собственными проектными циклами с точки зрения своих интересов.

V. L. Poryadina, N. S. Kosoi
(Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia)

TARGET COORDINATION MODEL AT COMPETITION MANAGEMENT SOCIO-ECONOMIC PROJECTS

Abstract. This article presents a model of targeted coordination of socio-economic projects, which allows the administrative body to develop coordinating impacts on performers based on information on the current mismatch of project cycles. The impacts found allow the performers to find control over their project cycles, minimize deviations of the overall process from a given target state, and at the same time should maintain the “optimality” of managing their own project cycles from the point of view of their interests.

Рассмотрим двухуровневую организационную систему, имеющую N элементов нижнего уровня (проекты, прошедшие конкурсный отбор и принятые к исполнению), и один элемент верхнего уровня (координатор – административный орган, отвечающий за развитие и реализацию программ).

Введем обозначения:

C_0 – координатор;

C_1, \dots, C_N – исполнители, осуществляющие непосредственное управление проектными циклами P_1, P_2, \dots, P_N , составляющими общий процесс управления проектами в регионе,

$$P = \langle P_1, \dots, P_N, u_1, \dots, u_N, m_1, \dots, m_N, u_1, \dots, u_N, \Delta u_0, V \rangle, \quad (1)$$

где V – взаимосвязи между проектными циклами; u_1, \dots, u_N – координирующие воздействия; m_1, \dots, m_N – управляющие воздействия; u_1, \dots, u_N – информация о состоянии проектных циклов; Δu_0 – информация о рассогласовании проектных циклов; N – общее количество координируемых проектов.

Функционирование такой системы представляется следующим образом. Координатор C_0 , имея информацию Δu_0 о текущем рассогласовании проектных циклов P_1, P_2, \dots, P_N , старается сделать как можно меньше отклонение всего процесса P от того состояния, которое определено программой развития региона. При этом координатор использует не всю информацию о состоянии проектных циклов u_i , а только части Δu_0 , отражающей возникающие рассогласования между составляющими управляемых проектных циклов. Кроме того, C_0 не воздействует непосредственно на проектные циклы P_i , а управляет ими опосредованно, путем подачи координирующих воздействий y_1, \dots, y_N на C_1, \dots, C_N [1].

Принципиальным качеством координации является определенная свобода в выборе исполнителями проектов своего поведения, например, возможность выбора характеристик проектов, исходя из собственного мнения в сложившейся ситуации. Кроме того, они могут самостоятельно формулировать цели проекта и выбирать критерии принятия проектных решений, которые не всегда будут совпадать с глобальной целью развития региона и даже ей противоречить. В результате чего и возникают неантагонистические конфликты, участниками которых выступают исполнители проекта и администрация региона.

В случаях, когда административные органы региона могут самостоятельно справиться с дополнительными функциями и возрастающими потоками информации, эти конфликты можно ликвидировать силовым способом. Но тогда исполнителей проекта можно безболезненно исключить из состава системы, а все функции по управлению проектами должен взять на себя координатор. Чаще всего, центральный орган перегружен информационными потоками и физически не способен управлять всеми проектами без исполнителей. Таким образом, координация возникает как своеобразная плата за децентрализацию управления или как реакция целого на его расчленение.

Включение исполнителей в общий цикл управления формально означает расчленение общей задачи управления проектами на три совместно решаемые задачи.

Для определенности предположим, что локальные задачи управления, решаемые исполнителями проектов, сводятся к тому, чтобы при фиксированных координирующих воздействиях минимизировать отклонения своих проектных циклов от заданных целевых состояний. Тогда задача координатора будет заключаться в том, чтобы на основании информации о характере рассогласования частных проектных циклов выработать координирующее решение и довести до исполнителей такие координирующие воздействия, которые заставят их или помогут им вырабатывать локальные управляющие воздействия на проектные циклы, отвечающие не только собственным интересам, но и интересам региона.

Пусть C_1, \dots, C_N вырабатывают управляющие воздействия m_i^* ($i = \overline{1, N}$), так что

$$\delta_{P_i}[m_i^*(y_i, u_i)]|_t^{t+T} \rightarrow \min_{m_i \in M_i}, i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где $\delta_{P_i}(\cdot)$ – функции, характеризующие отклонение управляемых проектных циклов P_1, P_2, \dots, P_N от заданных целевых состояний; M_i ($i = \overline{1, N}$) – область допустимых управляющих воздействий; t – время; T – рассматриваемый промежуток времени [2].

Следовательно, функции C_1, \dots, C_N сводятся к тому, чтобы при фиксированных координирующих воздействиях y_1, \dots, y_N минимизировать отклонения управляемых проектных циклов δ_{P_i} от заданных целевых состояний M_i ($i = \overline{1, N}$). Тогда задача координатора C_0 будет заключаться в выработке таких координирующих воздействий y_1^*, \dots, y_N^* , что

$$\delta_P[m_1^*(y_1^*, u_1), \dots, m_N^*(y_N^*, u_N), \Delta u_0, V]|_t^{t+T} \rightarrow \min_{y_1, \dots, y_N \in Y}, \quad (3)$$

где $\delta_P(\cdot)$ – функция, характеризующая отклонение управляемого процесса P от заданного целевого состояния; Y – область допустимых координирующих воздействий; $v = v(m_1, \dots, m_N, y_1, \dots, y_N)$ – функция, ограничивающая выбор управляющих и координирующих воздействий из-за взаимосвязанности проектных циклов.

Таким образом, задача целевой координации формально будет заключаться в том, чтобы координатор C_0 , используя знания о характере рассогласования частных проектных циклов Δu_0 , нашел координирующие воздействия y_1^*, \dots, y_N^* на исполнителей C_1, \dots, C_N , позволяющие им выработать управления своими проектными циклами. Найденные воздействия минимизируют отклонения общего процесса P от заданного целевого состояния Y , но в то же время должны сохранять «оптимальность» управления собственными проектными циклами с точки зрения своих интересов.

Список использованных источников

1. Порядина, В. Л. Управление социально-экономическими проектами: конкурсный подход : монография / В. Л. Порядина. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2015. – 230 с.
2. Системный анализ и его приложения: учебное пособие / С. А. Баркалов и др. – Воронеж : Научная книга, 2008. – 439 с.

Секция II

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

**В. Ю. Богомолов, О. А. Абоносимов,
Д. Н. Протасов, Д. С. Лазарев, С. И. Котенев**
(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия)

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

Аннотация. Математическое описание процесса электробаромембранного разделения основано на решении уравнений Нернста–Планка и Пуассона–Больцмана. Полученное решение позволяет рассчитывать концентрацию на выходе из электробаромембранного аппарата, удельный выходной поток растворителя.

**V. Yu. Bogomolov, O. A. Abonosimov,
D. N. Protasov, D. S. Lazarev, S. I. Kotenev**
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

MATHEMATICAL APPROACH FOR FORECASTING THE PROCESS OF ELECTROBAROMEMBRANE SEPARATION OF TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

Abstract. The mathematical description of the process of electrobaromembrane separation is based on the solution of the Nernst–Planck and Poisson–Boltzmann equations. The resulting solution allows you to calculate the concentration at the outlet of the electrobaromembrane apparatus, the specific output stream of the solvent.

Введение. Рассматривается задача оптимального планирования проекта.

Для управления техническими системами и технологическими процессами применяются методы математического моделирования и оптимизации технологических процессов производства. При построении системы автоматического управления мембранным процессом рекомендуется использовать усовершенствованную математическую модель, позволяющую прогнозировать параметры мембранного разделения. Математическое описание мембранных про-

цессов разделения, рассмотренных в работах [1 – 4], не полностью учитывает динамику мембранного процесса, включающую диффузионные, осмотические и гидродинамические процессы. А в случае электробаромембранного процесса учету не подлежат электродиффузионный и электроосмотический переносы. Универсальный подход, учитывающий динамику процесса, позволит наиболее точно, с позиции физики мембранного процесса, описать математически электробаромембранный процесс и проверить их адекватность на реальных химических процессах. Поэтому целью данной работы является разработка математического описания, основанного на решении уравнений Нернста–Планка и Пуассона–Больцмана, учитывающего не только диффузионные, осмотические, гидродинамические процессы, а и электродиффузионные и электроосмотические переносы вещества.

Рассмотрим математическую запись задачи массопереноса через мембраны при наложении трансмембранного давления и электрического потенциала при течении раствора в плоском межмембранном канале [5, 6]:

$$\nabla \left[\eta \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right] + \rho (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} + \nabla P = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla (-D \nabla c - z \nu F \nabla U) = -\mathbf{u} \nabla c, \quad (3)$$

$$-\nabla \varepsilon_{\text{vac}} \varepsilon_r \nabla U = \theta, \quad (4)$$

где η – выход по току; \mathbf{u} – вектор поля скоростей; ρ – плотность раствора, кг/м³; P – трансмембранное давление, Па; D – коэффициент диффузии, м²/с; c – концентрация вещества в растворе, кг/м³; z – валентность; ν – подвижность ионов, м²/(В·с); F – постоянная Фарадея, Кл/моль; U – продольная скорость течения раствора в элементе, м/с; ε – диэлектрическая постоянная; θ – плотность электрического заряда, Кл/м³.

Выражение для гидродинамики ламинарного, стационарного, установившегося течения жидкости имеет вид

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}(x, y)}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial P(x, y)}{\partial x} - \frac{\partial \pi(x, y)}{\partial x} \right), \quad (5)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости раствора, Па·с; π – осмотическое давление, Па.

Граничные условия:

$$\mathbf{u}(x, Y) = 0, \quad (6)$$

$$\mathbf{u}(x, -Y) = 0, \quad (7)$$

где Y – параметр по полувысоте межмембранного канала, м.

С учетом изменения давления только вдоль оси канала уравнение (5) можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial \pi}{\partial x} \right). \quad (8)$$

Проинтегрировав уравнение (8) по переменной y , соответствующее направлению вдоль оси канала, получаем решение в виде

$$\mathbf{u}(x, y) = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{dP}{dx} - \frac{d\pi}{dx} \right) y^2 - \frac{1}{2\mu} \left(\frac{dP}{dx} - \frac{d\pi}{dx} \right) Y^2 = -\frac{1}{2\mu} \left(\frac{dP}{dx} - \frac{d\pi}{dx} \right) (Y^2 - y^2). \quad (9)$$

Расход жидкости через канал определяем по формуле

$$Q = -\frac{2bY^3}{3\mu} \left(\frac{dP}{dx} - \frac{d\pi}{dx} \right), \quad (10)$$

где b – ширина канала, м.

Электроосмотический поток, возникающий в результате электроосмотического давления, можно записать как

$$Q = -\frac{2bY^3}{3\mu} \left(\frac{d(\Delta P - \Delta \pi)}{dx} \right). \quad (11)$$

Дифференциальное уравнение для проницаемости

$$Q_{x+\Delta x} - Q_x = dQ = 2b\gamma(x)dx, \quad (12)$$

где γ – поперечная скорость течения раствора в элементе, м/с.

Отсюда получаем

$$\frac{dQ}{dx} = -2b\gamma(x). \quad (13)$$

Знак « \rightarrow » из-за того, что расход в канале убывает.

Учитывая вышеприведенные преобразования, получим:

$$\frac{dQ}{dx} = -2bk(\Delta P - \Delta \pi_e), \quad (14)$$

$$\frac{dQ_1}{dx} = -2bk\Delta P, \quad (15)$$

$$\frac{dQ_2}{dx} = 2bk\Delta \pi_e, \quad (16)$$

где k – параметр, характеризующий коэффициент задержания растворенного вещества в мембранах.

Уравнение для случая оттока под действием трансмембранного давления представляем как

$$-\frac{2bY^3}{3\mu} \left(\frac{d^2 P(x)}{dx^2} \right) dx = -2bkP(x)dx. \quad (17)$$

Обозначив $\lambda = \frac{3\mu k}{R^3}$, где $\lambda > 0$, так как $\mu > 0$, $k > 0$, $R > 0$, получим линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 P(x)}{dx^2} - \lambda P(x) = 0. \quad (18)$$

Решение дифференциального уравнения (18) принимает вид $P(x) = C_1 e^{\sqrt{\lambda}x} + C_2 e^{-\sqrt{\lambda}x}$. Определив постоянные интегрирования C_1 и C_2 , с учетом граничных условий получим

$$P(x) = \frac{P_f - P_{in} e^{-\sqrt{\lambda}L}}{e^{\sqrt{\lambda}L} - e^{-\sqrt{\lambda}L}} e^{\sqrt{\lambda}x} + \frac{P_{in} e^{\sqrt{\lambda}L} - P_f}{e^{\sqrt{\lambda}L} - e^{-\sqrt{\lambda}L}} e^{-\sqrt{\lambda}x}. \quad (19)$$

В результате проведенных преобразований и расчетов можно сделать вывод, что первая производная гидродинамического давления будет равна

$$\frac{dP(x)}{dx} = \frac{P_f - P_{in} e^{-AL}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{Ax} A - \frac{P_{in} e^{AL} - P_f}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{-Ax} A, \quad (20)$$

где $A = \sqrt{\lambda} = \frac{\sqrt{3Y^3 \mu k}}{Y^3}$.

Для случая оттока под действием электроосмотического давления имеем

$$-\frac{2bY^3}{3\mu} \left(\frac{d^2 \pi_e(x)}{dx^2} \right) dx = -2bk \pi_e(x) dx. \quad (21)$$

Проведя аналогичные преобразования для электроосмотического давления, получим

$$\frac{d\pi_e(x)}{dx} = \frac{\pi_{ef} - \pi_{ein} e^{-AL}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{Ax} A - \frac{\pi_{ein} e^{AL} - \pi_{ef}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{-Ax} A. \quad (22)$$

Таким образом, с учетом уравнений (18) и (20) можно записать

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(x, y) &= -\frac{1}{2\mu} \left(\frac{P_f - P_{in} e^{-AL}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{Ax} A - \frac{P_{in} e^{AL} - P_f}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{-Ax} A - \right. \\ &\quad \left. \frac{\pi_{ef} - \pi_{ein} e^{-AL}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{Ax} A - \frac{\pi_{ein} e^{AL} - \pi_{ef}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{-Ax} A \right) (Y^2 - y^2) = \\ &= \frac{A}{2\mu} \left(\frac{P_f - P_{in} e^{-AL}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{Ax} - \frac{P_{in} e^{AL} - P_f}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{-Ax} - \frac{\pi_{ef} - \pi_{ein} e^{-AL}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{Ax} - \frac{\pi_{ein} e^{AL} - \pi_{ef}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{-Ax} \right) (Y^2 - y^2). \quad (23) \end{aligned}$$

Проницаемость мембраны с учетом электроосмотического давления определяем как

$$v = k(\Delta P - \Delta \pi) = k(P_{\text{in}} - P(x) - \pi_e(x) + \pi_{\text{ein}}). \quad (24)$$

Подставив выражения для составляющих давления в уравнение проницаемости (24) получим

$$v(x, y) = k \left(P_{\text{in}} - \frac{P_f - P_{\text{in}} e^{-AL}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{Ax} - \frac{P_{\text{in}} e^{AL} - P_f}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{-Ax} - \frac{\pi_{\text{ef}} - \pi_{\text{ein}} e^{-AL}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{Ax} - \frac{\pi_{\text{ein}} e^{AL} - \pi_{\text{ef}}}{e^{AL} - e^{-AL}} e^{-Ax} + \pi_{\text{ein}} \right). \quad (25)$$

Подставляем полученные выражения для продольной и поперечной скоростей в уравнение (3) и решаем его совместно с уравнением (4) численным методом, находим распределение концентрации анионов по длине и высоте канала.

Уравнение Нернста–Планка имеет вид

$$\nabla(-D\nabla c(x, y) - zvF\nabla U(x, y)) = - \left(\mathbf{u}(x, y) \frac{\partial c(x, y)}{\partial x} + v(x, y) \frac{\partial c(x, y)}{\partial y} \right) \quad (26)$$

с граничными условиями:

$$c(0, y) = c_{\text{in}}, \quad (27)$$

$$Rv(x, -R)c(x, -R) = D\nabla c(x, -Y) + zvFc(x, -Y)\nabla U(x, -Y), \quad (28)$$

$$Rv(x, Y)c(x, Y) = D\nabla c(x, Y) + zvFc(x, Y)\nabla U(x, Y). \quad (29)$$

Уравнение Пуассона–Больцмана имеет вид

$$-\nabla \varepsilon_{\text{vac}} \varepsilon_r \nabla U(x, y) = \theta \quad (30)$$

при граничных условиях:

$$U(x, -Y) = -\gamma_{\text{in}}, \quad (31)$$

$$U(x, Y) = \gamma_{\text{in}}, \quad (32)$$

$$U(L, y) = 0, \quad (33)$$

$$U(0, y) = 0. \quad (34)$$

При расчетах используются основные кинетические характеристики электробаромембранного процесса, полученные при экспериментальных исследованиях разделения модельных технологических растворов.

Проверка адекватности математической модели проводилась путем сравнения расчетных данных и полученных экспериментально по изменению концентрации целевого вещества относительно давления при постоянной плотности тока в процессе электробаромембранного процесса разделения.

Отклонения расчета от эксперимента не превышают 15%, что свидетельствует о достаточно высокой точности математического подхода при прогнозировании эффективности электробаромембранного метода в разделении технологических растворов.

Список использованных источников

1. FILMTEC Reverse osmosis membranes. Technical Manual. – USA, 2004.
2. Поляков, Ю. С. Неравномерное осаждение частиц на внешней и внутренней поверхности полупроницаемых мембран : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Ю. С. Поляков. – М., 2007.
3. Шоботов, С. С. Математическое моделирование процесса обратноосмотической деминерализации воды / С. С. Шоботов, А. А. Квитка, Ф. Френдж // Вост.-Евр. журн. перед. техн. – 2010. – Т. 2, № 10(44). – С. 55.
4. Vasin, S. I. Permeability of complex porous media / S. I. Vasin, A. N. Filippov // Colloid J. – 2009. – V. 71, № 1. – P. 31–32. [Васин С. И., Филиппов А. Н. Проницаемость сложнопористых сред // Коллоидный журнал. – 2009. – Т. 71, № 1. – С. 31–32.]
5. Головашин, В. Л. Математическая модель совместного электротепло-массопереноса в электробаромембранных системах // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2014. – № 4. – С. 734.
6. Эмпирическая модель ультрафильтрационного концентрирования белка в подсырной сыворотке / С. И. Лазарев, В. Ю. Богомолов, А. А. Арзамасцев и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. Сер. Ест. и техн. науки. – 2016. – Т. 21, № 2. – С. 655.

Е. И. Акулинин, О. О. Голубятников, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий
(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия)

ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В ЦИКЛИЧЕСКИХ АДСОРБЦИОННЫХ СИСТЕМАХ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Аннотация. Сформулирована задача оптимизации стационарного периодического процесса обогащения воздуха кислородом в установке короткоциклового безнагревной адсорбции в условиях неопределенности. Разработаны алгоритм и двухуровневая система адаптивного управления процессом обогащения воздуха кислородом.

E. I. Akulinin, O. O. Golubyatnikov, D. S. Dvoretzky, S. I. Dvoretzky
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

OPTIMIZATION AND CONTROL IN PRESSURE SWING ADSORPTION GASEOUS MIXTURES SEPARATION UNITS

Abstract. The problem of cyclic steady state of air oxygen enrichment optimization process in pressure swing adsorption unit under uncertainty is formulated. An algorithm and a two-level adaptive control system of the oxygen enrichment process are developed.

Процессы короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА) разделения смесей газов широко применяют в промышленности для извлечения/концентрирования водорода, кислорода, диоксида углерода, азота, метана и др. Технологический процесс концентрирования кислорода осуществляют в двухадсорберной установке КБА с гранулированными цеолитами NaX [1]. При этом достигается обогащение воздуха кислородом с чистотой до ~90...95 об. %.

Исходная газовая смесь подается в установку КБА после предварительной осушки с избыточным давлением. Подъем давления в адсорберах производится открытием управляемых клапанов, продукционные газы выводятся из адсорберов через управляемые клапаны. Противоточная регенерация адсорбента в адсорбционных колоннах осуществляется путем пропускания продувочной (обогащенной кислородом) газовой смеси через соответствующие клапаны. Согласованная работа клапанов установки КБА обеспечивает последовательное осуществление в каждом адсорбере всех стадий циклического адсорбционного процесса.

Целью данной работы является разработка алгоритма оптимизации и системы автоматического управления циклическим адсорбционным процессом разделения газовой смеси, обеспечивающих поддержание максимальной степени извлечения кислорода при выполнении требований технологического регламента по чистоте кислорода, производительности установки и ресурсосбережению гранулированного адсорбента.

Анализ циклического адсорбционного процесса разделения атмосферного воздуха и концентрирования кислорода позволил установить [2]: 1) неопределенные параметры $\xi = \{y_{env}, T_{env}, P_{env}\}$ – состав, температуру и давление окружающей среды; 2) управляющие параметры $u(t)$ – длительность цикла t_c или продолжительность t_{ads} ($t_{ads} = t_{des} = t_c / 2$) стадии адсорбции (полуцикла); P^{in} – давление на выходе компрессора, коэффициент θ обратного потока, отбираемого на регенерацию адсорбента; законы (программы изменения во времени)

$\psi_{v_1}(\tau), \psi_{v_3}(\tau), \tau \in [0, t_c/2], \psi_{v_2}(\tau), \psi_{v_4}(\tau), \tau \in [t_c/2, t_c]$, открытия управляемых впускных v_1, v_3 и выпускных v_2, v_4 клапанов; 3) выходные переменные – степень извлечения/концентрирования η кислорода, вектор концентрации y_{st}^{out} компонентов продукционного потока и производительность G^{out} установки КБА в стационарном периодическом процессе (при $t = t_{st}$).

В качестве критерия оптимизации использовали среднее значение степени извлечения η кислорода в условиях неопределенности $\xi = \{y_{env}, T_{env}, P_{env}\}$, т.е. $M_\xi \{\eta(u, y_{st}^{out}, \xi)\}$, где M_ξ – символ математического ожидания.

Задача оптимизации стационарного периодического режима функционирования установки КБА в условиях неопределенности по критерию $M_\xi \{\eta(u, y_{st}^{out}, \xi)\}$ формулировалась следующим образом: требуется определить управляющие переменные $u^* = \{t_{ads}^*, P^{in*}, \psi_1^{\lambda*}, \psi_3^{\lambda*}, \psi_2^{\lambda*}, \psi_4^{\lambda*}, \lambda = \overline{1, m}, \theta^*\}$, такие, что среднее значение степени извлечения кислорода в стационарном периодическом режиме (при $t = t_{st}, y_{st}^{out}(t_{st}) = y_{st}^{out} \approx const$) достигало максимального значения, т.е.

$$I(u^*) = \max_{u \in U} M_\xi \{\eta(u, y_{st}^{out}, \xi)\} \quad (1)$$

при связях в виде уравнений математической модели [1] и ограничениях на:

значение концентрации $y_{1,st}^{out}$ продукционного кислорода

$$\max_{\xi \in \Xi} \{g_1(u, \xi) = y_{1,def}^{out} - y_{1,st}^{out}(u, \xi)\} \leq 0; \quad (2)$$

производительность G^{out} установки КБА

$$\max_{\xi \in \Xi} \{g_2(u, \xi) = G_{def}^{out} - G^{out}(u, \xi)\} \leq 0; \quad (3)$$

скорость газовой смеси v_g в «лобовом» слое адсорбента

$$\max_{\xi \in \Xi} \{g_3(u, \xi) = \max_{\tau \in [0, t_c]} v_g(u, \xi, \tau) - v_g^+ \} \leq 0; \quad (4)$$

перепад давления в слое адсорбента на стадиях адсорбции и десорбции

$$\max_{\xi \in \Xi} \{g_4(u, \xi) = \max_{\tau \in [0, t_c/2]} \Delta P_{ads}(u, \tau, \xi) \leq 0,$$

$$\max_{\xi \in \Xi} \{g_5(u, \xi) = \max_{\tau \in [0, t_c/2]} \Delta P_{des}(u, \tau, \xi) \leq 0; \quad (5)$$

управления

$$t_{\text{ads}}^- \leq t_{\text{ads}} \leq t_{\text{ads}}^+, \quad P^{\text{in}-} \leq P^{\text{in}} \leq P^{\text{in}+},$$

$$0 \leq \psi_j^\lambda \leq 1, \quad j = 1, 2, 3, 4; \quad \lambda = \overline{1, m}, \quad \theta^- \leq \theta \leq \theta^+, \quad (6)$$

где v_g^+ – максимально допустимая скорость газовой смеси в «лобовом» слое адсорбента.

Ограничения (2)–(3) вычислялись через решение уравнений математической модели динамики до наступления стационарного периодического режима (20 – 30 циклов), а ограничения (4)–(5) – на отрезке времени $[0, t_c]$. Физический смысл ограничения (4) заключается в предохранении гранулированного адсорбента от разрушения вследствие аэродинамического удара при полном (скачкообразном) открытии клапанов технологической установки КБА.

Сформулированная задача оптимизации (1) – (6) при допущении об аппроксимации непрерывных функций управлений $\psi_{v_1}(\tau), \psi_{v_3}(\tau), \tau \in [0, t_c/2]$, $\psi_{v_2}(\tau), \psi_{v_4}(\tau), \tau \in [t_c/2, t_c]$, кусочно-постоянными функциями $\psi_1^\lambda, \psi_3^\lambda, \psi_2^\lambda, \psi_4^\lambda, \lambda = \overline{1, m}$, относится к классу задач нелинейного программирования, ее решение осуществляется методом последовательного квадратичного программирования.

Программа изменения во времени степени открытия клапанов может быть реализована в соответствии с равномерным, выпуклым и вогнутым законами изменения (рис. 1, а), при этом динамика изменения давления в адсорбере соответствует этому закону (рис. 1, б).

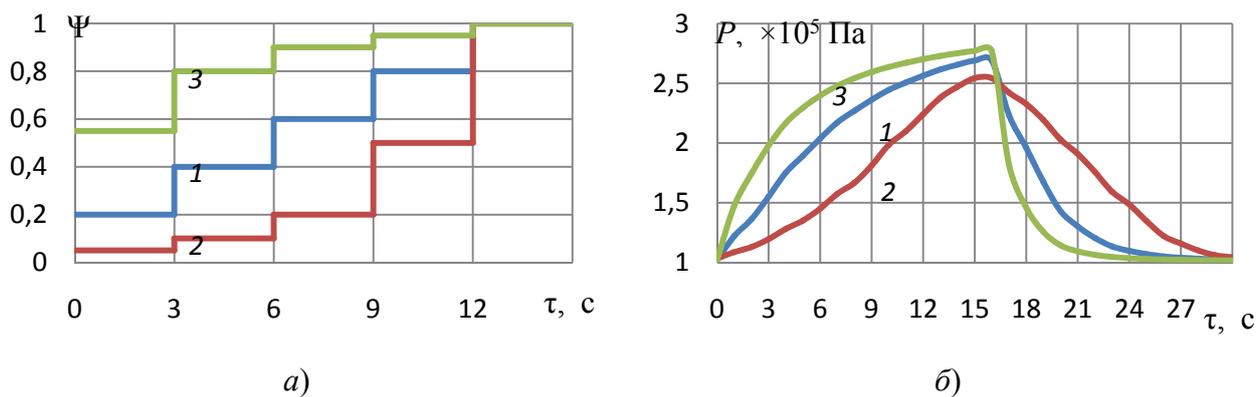


Рис. 1. Динамика изменения степени открытия клапанов (а), давления (б) в адсорбере в одном цикле (0...15 с – адсорбция; 16...30 с – десорбция) при различных законах изменения:
 1 – равномерный; 2 – выпуклый; 3 – вогнутый

Анализ зависимости концентрации и степени извлечения продукционного кислорода от длительности цикла «адсорбция–десорбция» t_c в установке КБА при различных законах изменения степени открытия клапанов позволяет

заклучить, что использование вогнутого закона (рис. 1, *a*, кривая 3) обеспечивает достижение максимальной концентрации кислорода $y_1^{\text{out}} = 92\%$ об. на выходе из установки КБА гораздо быстрее по сравнению с равномерным законом (14 с против 16 с, кривые 3, 1 на рис. 2, *a*) и выпуклым (14 с против 28 с, кривые 3, 2 на рис. 2, *a*).

При этом степень извлечения η при использовании вогнутого закона (кривая 3 на рис. 2, *b*) значительно выше, чем при использовании равномерного закона (кривая 1 на рис. 2, *b*) и выпуклого закона (кривая 2 на рис. 2, *b*). В особенности эта закономерность проявляется при длительности цикла $t_c = 5 \dots 30$ с. Для сравнения, при $t_c = 20$ с имеем: 1 – $\eta = 14\%$; 2 – $\eta = 4\%$; 3 – $\eta = 27\%$ (рис. 2, *b*).

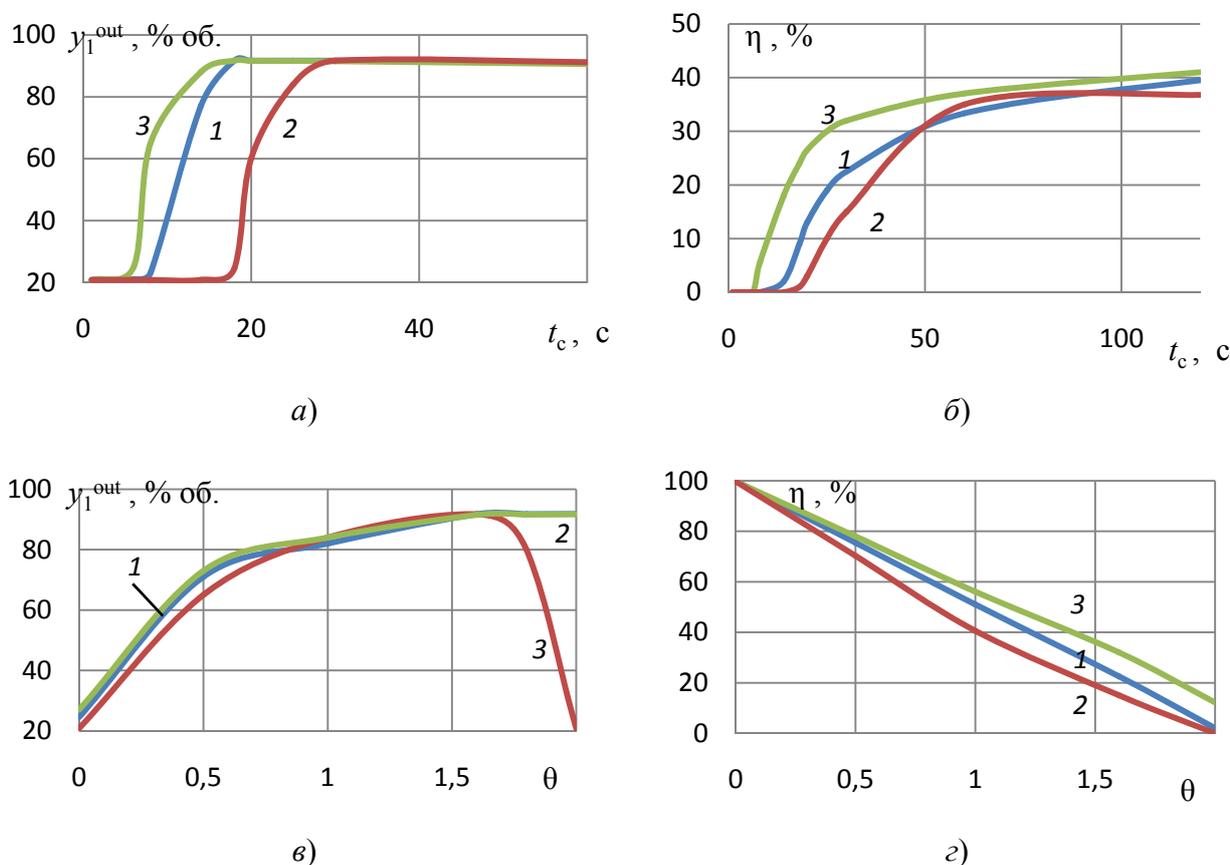


Рис. 2. Зависимость концентрации y_1^{out} (*a*, *v*) и степени извлечения кислорода η (*b*, *z*) от длительности t_c (*a*, *b*) цикла и коэффициента обратного потока θ (*v*, *z*) при различных законах изменения во времени степени открытия клапанов: 1 – равномерный; 2 – выпуклый; 3 – вогнутый

Влияние коэффициента обратного потока θ на концентрацию и степень извлечения продукционного кислорода при различных законах изменения во времени степени открытия клапанов выражено менее значимо. Так, при $\theta = 0,5$ различие между значениями степеней извлечения при использовании вогнутого

и выпуклого законов составляет 11%, а при $\theta = 1,5$ это различие увеличивается до $\sim 18\%$ (кривые 3, 2 на рис. 2, з).

С использованием результатов численного исследования разработаны алгоритм и двухуровневая система адаптивного управления циклическим адсорбционным процессом обогащения воздуха кислородом, обеспечивающие автоматический контроль возмущающих воздействий, оперативное решение задачи оптимизации при известном значении вектора $\xi = \{y_{\text{env}}^{(k)}, T_{\text{env}}^{(k)}, P_{\text{env}}^{(k)}, k = 1, 2, 3, \dots\}$ (на верхнем уровне) и изменение задания программному задатчику автоматической системы управления (на нижнем уровне).

Методом имитационного моделирования установлено, что случайные возмущения при $k = 1, 2, 3, \dots$ могут приводить к нарушению технологических ограничений по производительности установки и чистоте продукционного кислорода, а также снижению значения степени извлечения. Использование адаптивной оптимизации в системе управления позволяет повысить значение степени извлечения кислорода в установке КБА в среднем на 10% по сравнению с использованием системы автоматической стабилизации без адаптивной оптимизации.

Заключение. С использованием методов теории автоматического управления, системного анализа и математического моделирования получены новые научные результаты для проектирования автоматизированных циклических адсорбционных процессов разделения многокомпонентных газовых смесей и систем управления ими с учетом выполнения требований технологического регламента по степени извлечения и чистоте продукционного газа, производительности установки КБА и сбережению гранулированного цеолитового адсорбента от разрушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках проектной части государственного задания № 10.3533.2017.

Список использованных источников

1. Оптимальное проектирование короткоцикловых адсорбционных установок для концентрирования кислорода / Е. И. Акулинин, О. О. Голубятников, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий // Известия СПбГТИ (ТУ). – 2017. – № 41. – С. 103 – 111.

2. Управление циклическим адсорбционным процессом разделения газовых смесей / Е. И. Акулинин, О. О. Голубятников, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 4 / под общ. ред. А. А. Большакова. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – С. 129 – 132.

А. Ю. Атрепьев, А. В. Галкин
(ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
Липецк, Россия)

ПОСТРОЕНИЕ ИММИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА

Аннотация. В данной работе приводятся основные сведения об агломерационном производстве, проводится анализ производственных данных и построение математических моделей на их основе. Рассматривается задача структурной и параметрической идентификации, задача нейросетевого моделирования. Проведена проверка результатов расчета по построенным моделям.

A. Yu. Atrepiev, A.V. Galkin
(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

CONSTRUCTION OF AN SIMULATION MODEL OF AGROMERATE PRODUCTION

Abstract. This paper provides basic information about sinter production, analyzes production data and constructs mathematical models based on them. The problem of structural and parametric identification, the problem of neural network modeling is considered. The calculation results for the constructed models were verified.

Введение. Один из процессов, неразрывно связанных с современной металлургией, – агломерационное производство доменного сырья. Данный раздел является важным фактором для высокопроизводительной работы доменного производства [1]. Необходимо иметь четкий план производства, а также модель процесса, что дает возможность избежать многомиллионных потерь из-за отклонений в технологии.

Необходимым является наличие трех математическо-технологических моделей: материально-балансовой, производительности и качества [2]. Проведение расчетов важно для проверки на стадии подведения баланса. Критерием успешности модели служит производительность. Характеристикой качества агломерата является его холодная прочность. Данная величина описывает сопротивляемость материала к перегрузкам [3].

1. Модели и методы
- 1.1. Постановка задачи

Ставится задача построения имитационной модели процесса производства. Модель включает три составляющие: материально-балансовую модель, модель производительности и модель оценки качества (холодной прочности).

1.2. Материально-балансовая модель

Построение балансовой модели устанавливает порядок определения норм расходов компонентов агломерационной шихты на производство агломерата. Работая с данной моделью, необходимо представлять, какие факторы она имеет на входе и какой отклик на выходе. В качестве входных данных выступают компоненты шихты. Для каждого компонента известно его количество, химический состав (Fe, CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, Mn), влажность, потери при прокаливании.

Тогда для построения балансовой модели требуется провести следующие вычисления. Первоначально для каждого компонента требуется избавиться от лишней влажности. Определяется массовый расход влажного материала согласно формуле

$$Q_{\text{вл}_i} = \frac{Q_i \cdot 100}{\sum \text{ст. с}}, \quad (1)$$

где $\sum \text{ст. с}$ – сумма структурных составляющих.

Затем пересчитывается масса, которая останется в сухом состоянии, по формуле

$$Q_{\text{сух}_i} = Q_{\text{вл}_i} \cdot \frac{100 - W_i}{100}, \quad (2)$$

где W_i – влажность компонента.

Далее пересчитывается масса прокаленного материала по формуле

$$Q_{\text{п}_i} = Q_{\text{сух}_i} \cdot \frac{100 - \text{п.п.п}_i}{100}, \quad (3)$$

где п.п.п_{*i*} – потери при прокаливании для компонента.

Затем определяется химический состав агломерата. Для каждого химического элемента осуществляется расчет по формуле

$$\bar{Z}_i = \sum Z_i \cdot \frac{100}{\sum \text{общ}}, \quad (4)$$

где $\sum \text{общ}$ – сумма прокаленного материала.

1.3. Модель производительности

Расчет месячной производительности осуществляется по формуле

$$П = B \cdot H \cdot v \cdot 1440 \cdot y \cdot (1 - W)(1 - \text{п.п.п}) B_{\text{г}} t, \quad (5)$$

где B – ширина паллет; H – высота слоя шихты; v – скорость агломашины; y – насыпная масса шихты; $B_{\text{г}}$ – выход годного бункерного агломерата; W – влажность; п.п.п – потери при прокаливании; t – время работы агломашины.

1.4. Модель холодной прочности

Построение модели холодной прочности устанавливает качество агломерата в зависимости от его химического состава и технологических параметров аглопроизводства. Работая с данной моделью, необходимо представлять, какие факторы являются входными.

Для выявления факторов, влияющих на отклик [4], был произведен корреляционный анализ исходных данных, построена таблица корреляционных зависимостей, представленная на рис. 1.

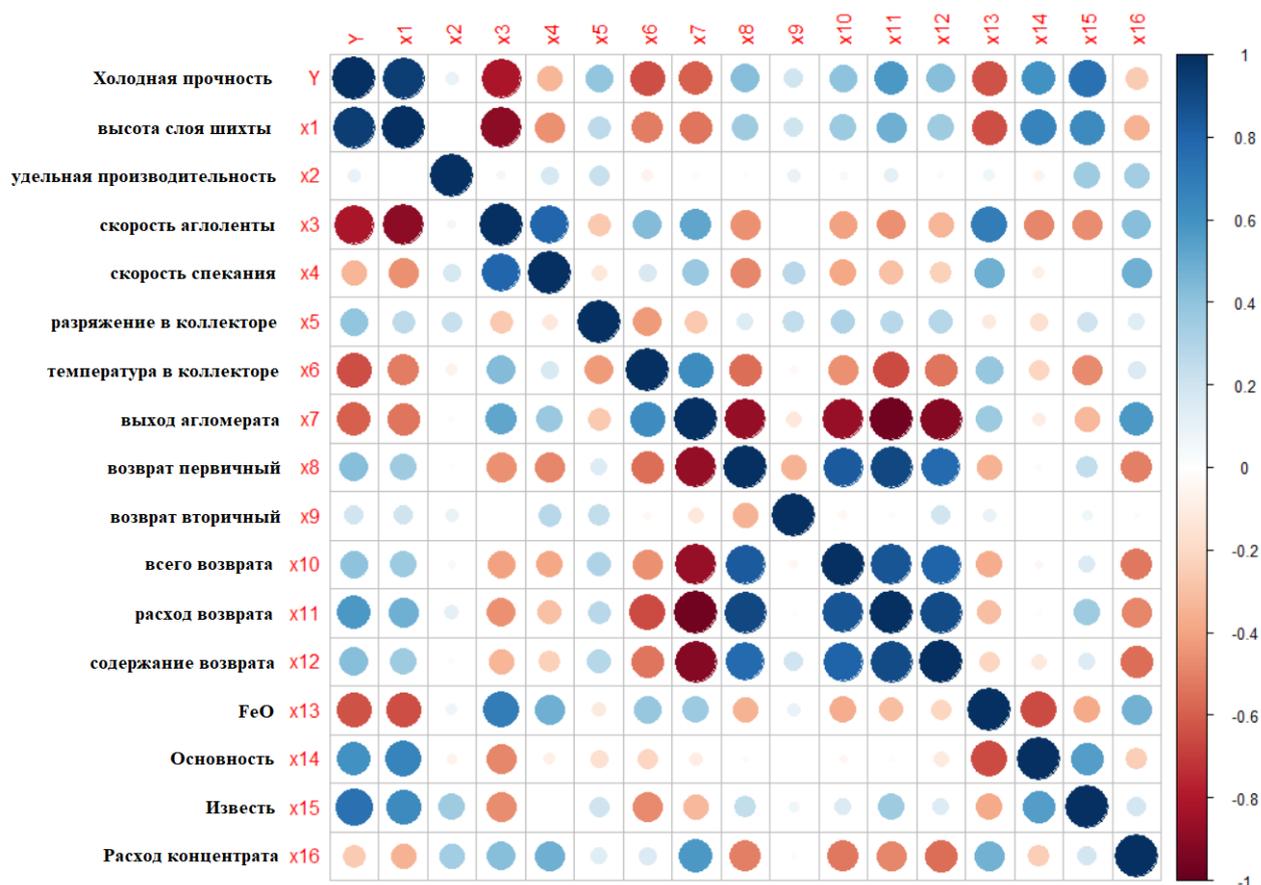


Рис. 1. Таблица корреляционных зависимостей

Было выявлено несколько факторов, влияющих на отклик: высота слоя шихты, скорость аглоленты, температура в коллекторе, содержание возврата, основность, известь, расход концентрата.

Используя вышеперечисленные факторы, была построена линейно-регрессионная модель [5] холодной прочности (Y):

$$Y = 0,2H + 1,625V - 0,082T - 4,421B + 0,159L - 19,019, \quad (6)$$

где H – высота слоя шихты; V – скорость аглоленты; T – температура в коллекторе; B – основность; L – известь. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,95$.

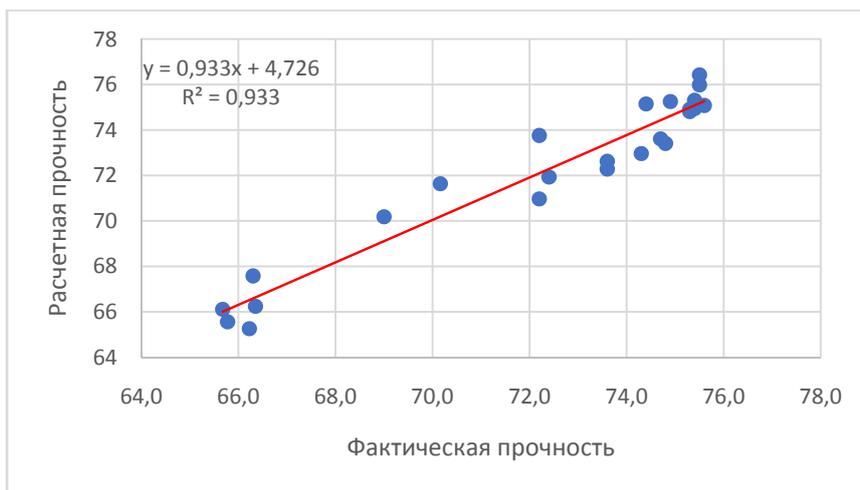


Рис. 2. Фактическая и расчетная прочности по уравнению (6)

Так же была построена нейросетевая модель [6] холодной прочности, структура которой приведена на рис. 3.

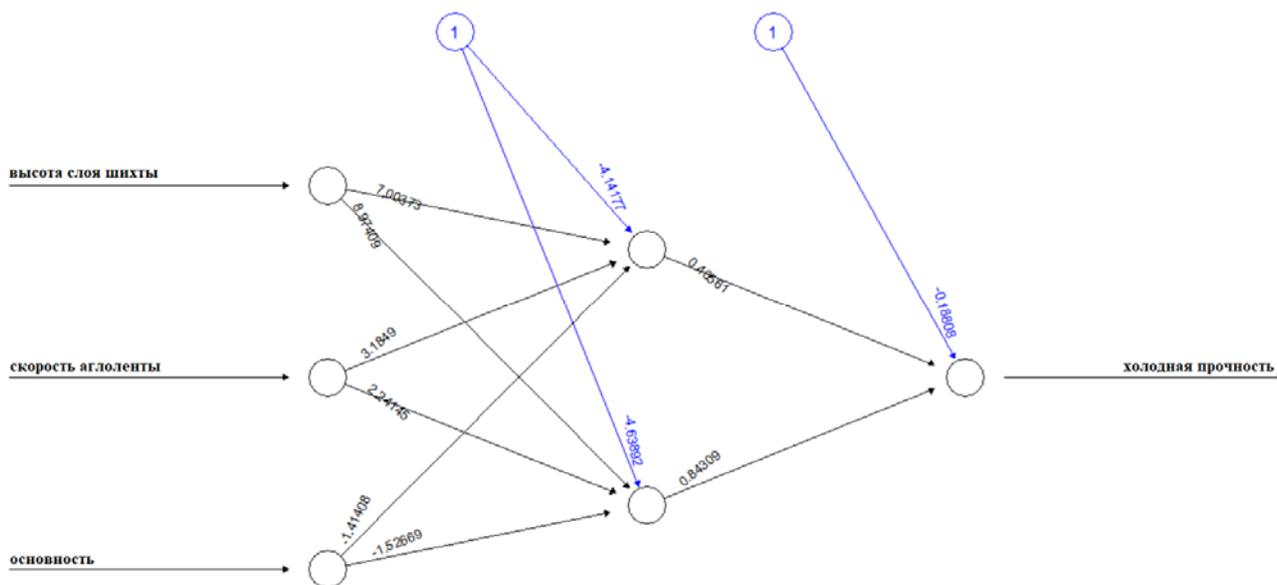


Рис. 3. Нейросетевая модель холодной прочности

На три входных нейрона поступают входные данные: высота слоя шихты, скорость аглоленты, основность. Функция активации на входном слое линейная. Два нейрона на скрытом слое имеют линейную функцию активации с насыщением. Выходной нейрон с линейной функцией активации выдает на выходе прогноз холодной прочности.

Проверка адекватности проводилась на тестовом множестве. Тестовое множество составлялось из исходной выборки путем случайного выбора 20% строк. Скорость аглоленты, высота шихты и основность из тестового множест-

ва поступали на вход нейросетевой модели. На выходе получали прогноз холодной прочности, и затем сравнивали его с фактическими данными холодной прочности методом МАРЕ. Точность прогноза составила 98%.

Проверка модели на реальных производственных данных выявила ее адекватность. Точность расчетных данных составила около 98%.

2. Обсуждение полученных результатов

В результате проделанной работы была решена задача построения имитационной модели процесса производства агломерата. Модель включает три составляющие: материально-балансовую модель, модель производительности и модель качества. Это позволяет производить достаточно точный прогноз относительно качества агломерата и его химического состава, давая возможность подбирать оптимальный план производства, что снижает издержки производства и увеличивает производительность.

Список использованных источников

1. Вегман, Е. Ф. Краткий справочник доменщика / Е. Ф. Вегман. – М. : Metallurgy, 1981. – 240 с.
2. Жилкин, В. П. Производство агломерата. Технология, оборудование, автоматизация / В. П. Жилкин, Д. Н. Доронин. – Екатеринбург : Марат, 2004. – 292 с.
3. Коротич, В. И. Агломерация рудных материалов / В. И. Коротич, Ю. А. Фролов, Г. Н. Бездежский. – Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.
4. Грачев, А. Н. Структурная и параметрическая идентификация линейных динамических объектов корреляционными методами / А. Н. Грачев, В. М. Понятский, В. К. Ту // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. Т. 11. – М. : ВСПУ-2014, 2014. – С. 28 – 38.
5. Кузнецова, Е. В. Эконометрика / Е. В. Кузнецова, Н. Ю. Жбанова. – Липецк : ЛГТУ, 2012. – 81 с.
6. Сараев, П. В. Нейросетевые методы искусственного интеллекта / П. В. Сараев. – Липецк : ЛГТУ, 2007. – 64 с.

Д. Н. Коновалов, С. И. Лазарев, С. В. Ковалев
(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия)

**ПРИМЕНЕНИЕ НАНОФИЛЬТРАЦИОННОГО И ЭЛЕКТРО-
НАНОФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ НА АО «ЗАВОД ТАМБОВПОЛИМЕРМАШ»
И АО «ТАГАТ» ИМЕНИ С. И. ЛИВШИЦА**

Аннотация. Рассмотрены схемы очистки сточных вод и технологических растворов машиностроительных (гальванических) предприятий, которые являются достаточно сложными и перспективными системами.

D. N. Konovalov, S. I. Lazarev, S. V. Kovalev
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

**APPLICATION OF NANO-FILTRATION AND ELECTRON-
NANO-FILTRATION PROCESS OF SEPARATION OF TECHNOLOGICAL
SOLUTIONS OF ELECTRICAL PRODUCTION
AT TAMBOVPOLIMERMASH PLANT JSC
AND TAGAT JSC NAMED AFTER S. I. LIVSHITSA**

Abstract. Sufficiently complex and promising systems are the schemes for wastewater treatment and technological solutions of engineering (galvanic) enterprises.

На промышленных предприятиях (химических, машиностроительных и других производств) в настоящее время остро стоит проблема очистки технологических растворов химических производств от присутствующих в жидкости органических и неорганических компонентов [1].

Ниже представлен пример реализации технологической схемы очистки кислотнo-щелочных и хромистых растворов на АО «Завод Тамбовполимермаш» и АО «ТАГАТ» имени С. И. Лившица г. Тамбова [1].

Новым подходом при использовании процессов мембранного разделения растворов является комбинированное применение последовательных ступеней нанofильтрационного выделения жидкости (пермеата (филтратa)) и отделения ретентата (концентрата) и электронанofильтрационного концентрирования определенных групп катионов и анионов в потоках прикатодного пермеата (в виде щелочного раствора) и прианодного пермеата (в виде подкисленного раствора), и получения потока ретентата [1].

Технологическое оформление данной схемы разделения растворов представлено на рис. 1 [1].

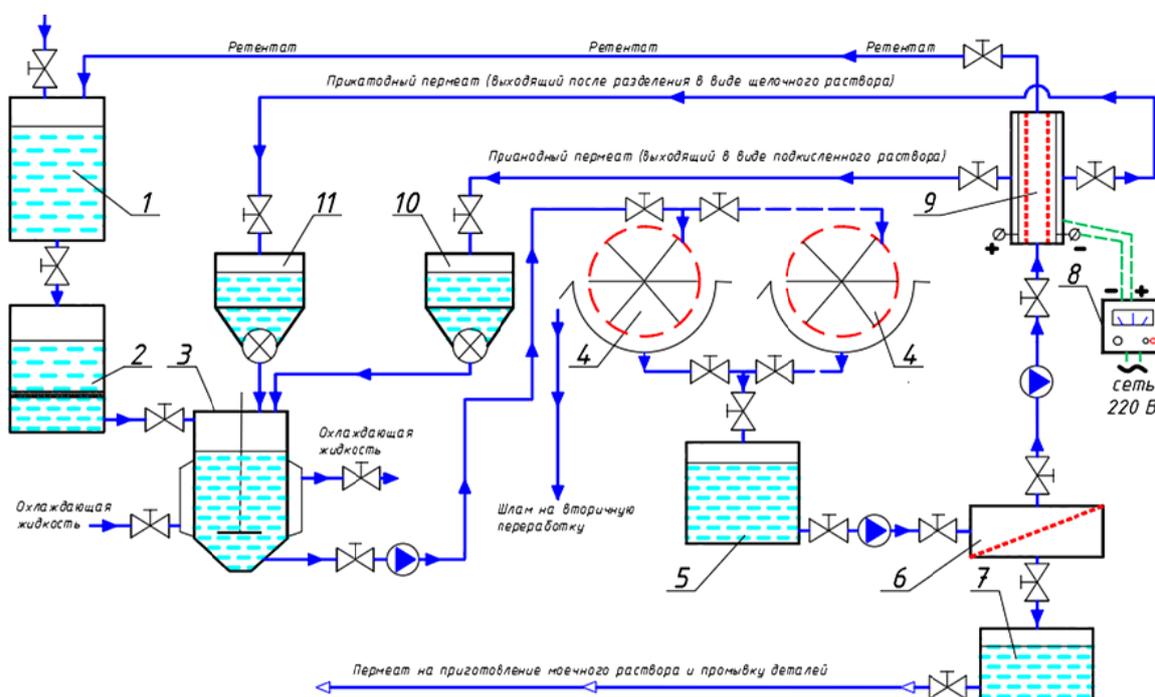


Рис. 1. Схема очистки технологических растворов гальванических производств от ионов тяжелых металлов с применением процессов нанофильтрации и электронанофильтрации [1]:

- 1 – емкость; 2 – фильтр механической (грубой) очистки; 3 – реактор; 4 – вакуум-фильтр; 5 – емкость; 6 – нанофильтрационный аппарат; 7 – емкость пермеата; 8 – источник питания постоянного тока; 9 – электронанофильтрационный аппарат; 10, 11 – дозаторы подкисленного и щелочного раствора

Схема очистки работает следующим образом (рис. 1): из цеха нанесения гальванических защитных покрытий поступает раствор в емкость 1 (в которой проводится лабораторный анализ pH среды), далее жидкость проходит фильтр механической (грубой) очистки 2 и поступает в реактор 3 [1].

При известном значении pH раствора, в зависимости от величины водородного показателя среды, щелочного (11) или кислотного (10) характера, для нейтрализации подается соответствующий реагент из дозаторов щелочного раствора 11 или подкисленного раствора 10 (на начальном этапе модельного раствора щелочного или кислотного реагента соответственно). При нейтрализации протекают химические реакции с тепловым эффектом порядка 13,7 ккал/моль.

Излишки тепла, образованного при взаимодействии данных соединений, отводятся с помощью подачи охлаждающего раствора (водопроводной воды с температурой от 5 до 150 °С) в рубашку аппарата. Для предотвращения образования застойных зон и равномерности протекания соответствующих реакций реактор 3 оснащен мешалкой [1].

Полученный при этом на выходе из реактора 3 раствор с помощью насоса поступает на вакуум-фильтр 4, где происходит отделение твердой фазы (шлам),

образующейся в результате реакций нейтрализации в виде шлама для дальнейшей переработки [1].

Существующие пути утилизации шламов гальванических производств связаны с использованием их в качестве добавок при производствах различных материалов хозяйственного назначения: бетона, керамзита, асфальта, пигментов, катализаторов и т.д. [2].

При этом гальваношламы могут дополнительно перерабатываться в несколько стадий, что также скажется на экономии материальных средств предприятия [3].

Раствор, прошедший вакуум-фильтр 4 и свободный от твердой фазы (шлама), накапливается в емкости 5. Далее жидкость с помощью насоса высокого давления подается на нанофильтрационный аппарат 6, где часть раствора в виде пермеата проникает сквозь поры мембран и отводится в емкость пермеата 7, откуда самотеком поступает на участок приготовления моечного раствора и промывку деталей. А большая часть раствора в виде ретентата (концентрата) с помощью насоса высокого давления (обеспечивающего высокую скорость циркуляции раствора) подается в электронанофильтрационный аппарат 9, который подключен с помощью электрических проводов к источнику питания постоянного тока 8 [1].

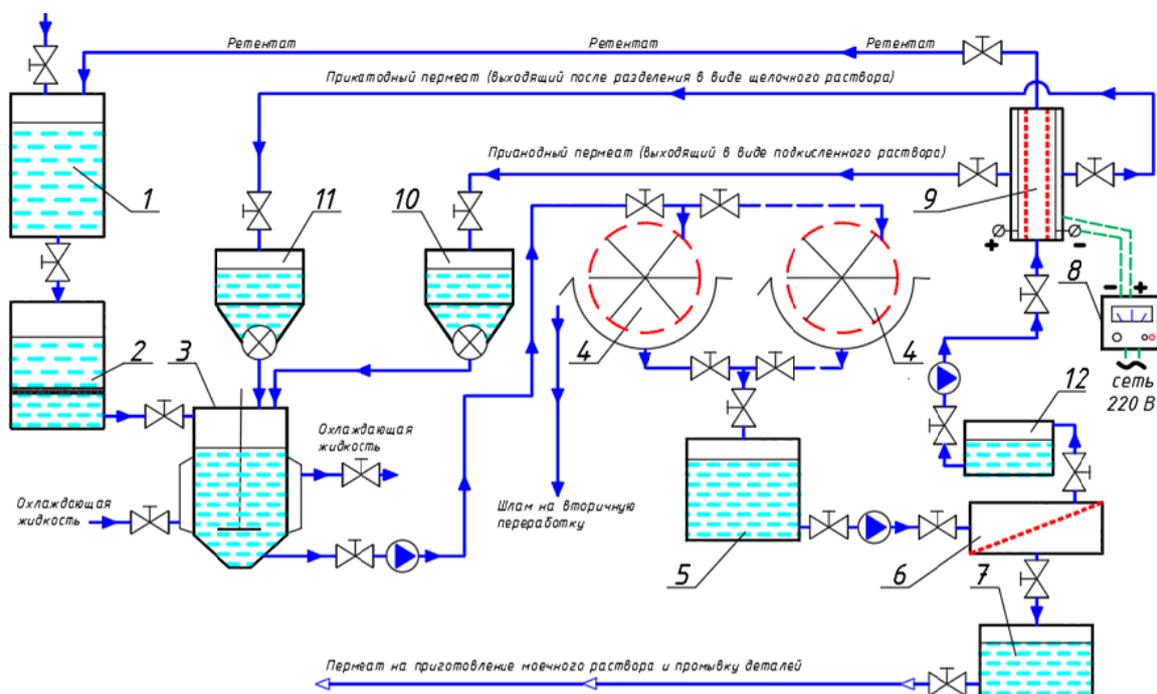


Рис. 2. Схема очистки технологических растворов гальванических производств от ионов тяжелых металлов с применением процессов нанофильтрации и электронанофильтрации при использовании промежуточной емкости:

- 1 – емкость; 2 – фильтр механической (грубой) очистки; 3 – реактор; 4 – вакуум-фильтр; 5 – емкость; 6 – нанофильтрационный аппарат; 7 – емкость пермеата; 8 – источник питания постоянного тока; 9 – электронанофильтрационный аппарат; 10, 11 – дозаторы подкисленного и щелочного раствора; 12 – промежуточная емкость

Присутствующие в технологическом растворе растворенные вещества диссоциируют на ионы. Так же под действием разности электрических потенциалов и градиента трансмембранного давления происходит выделение воды и миграция ионов через соответствующие мембраны при включенном в электрическую сеть источнике питания постоянного тока 8. Катионы металлов под действием электрического поля мигрируют к катоду, а анионы веществ – к аноду.

Усовершенствованным вариантом для разработанной схемы очистки растворов гальванических производств с применением полиамидных и эфирцеллюлозных (по некоторым данным ацетатцеллюлозных) мембран ОПМН-П и АМН-П является схема, представленная на рис. 2.

Дополнительным элементом схемы очистки технологических растворов гальванических производств (рис. 2) является промежуточная емкость 12, установленная на тракте ретентата после нанофильтрационного аппарата, позволяющая в любой момент времени контролировать концентрацию растворенных веществ в ретентате с помощью автоматического датчика соледержания.

Модернизированным вариантом совершенствования технологии очистки растворов гальванических производств выступает схема, представленная на рис. 3.

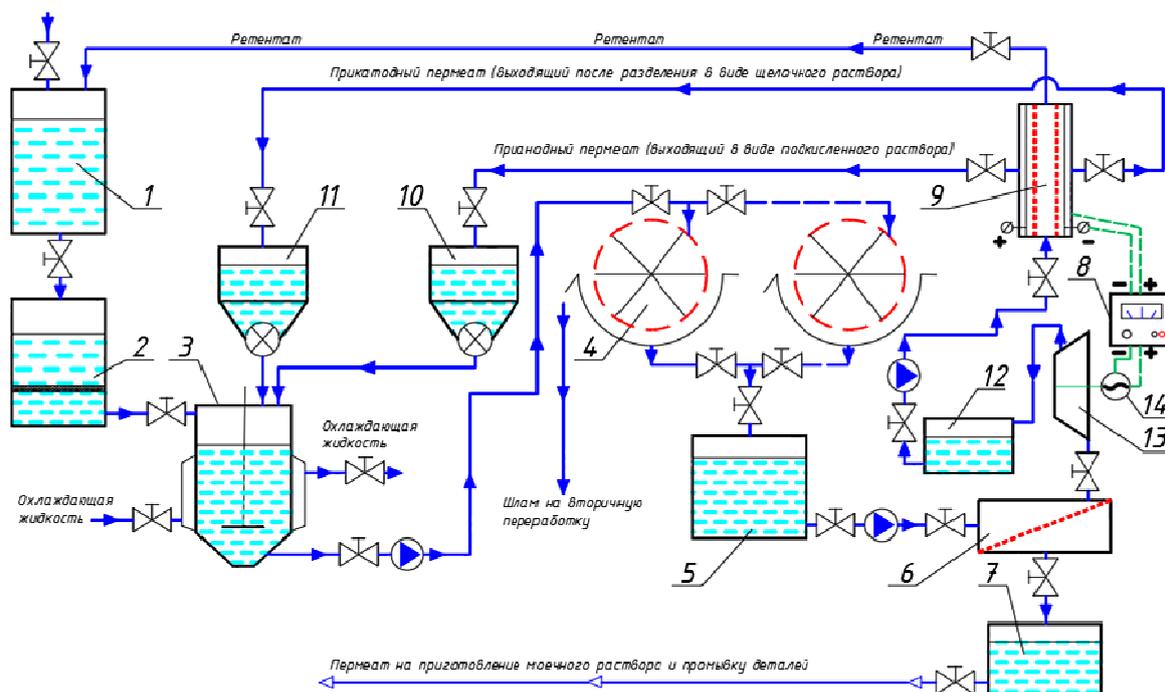


Рис. 3. Схема очистки технологических растворов гальванических производств от ионов тяжелых металлов с применением процессов нанофильтрации и электронанофильтрации при использовании промежуточной емкости, турбины и генератора переменного тока:

- 1 – емкость; 2 – фильтр механической (грубой) очистки; 3 – реактор; 4 – вакуум-фильтр;
- 5 – емкость; 6 – нанофильтрационный аппарат; 7 – емкость пермеата;
- 8 – источник питания постоянного тока; 9 – электронанофильтрационный аппарат;
- 10, 11 – дозаторы подкисленного и щелочного раствора; 12 – промежуточная емкость;
- 13 – турбина; 14 – генератор электрического тока

Технологическая схема, представленная на рис. 3, оснащена дополнительными элементами – турбиной 13 и генератором электрического тока 14. Кроме того, использована промежуточная емкость 12, установленная на тракте ретентата после нанофильтрационного аппарата.

Использование рекуператоров энергии (турбин с генераторами электрического тока) в схемах очистки промышленных растворов различных производств согласуется с имеющимися в работах В. Н. Слесаренко, А. А. Свитцова, С. И. Лазарева данными [4 – 6]. Но особенным обстоятельством при этом является то, что в этих работах не предусмотрено использование полученной электрической энергии для нужд электрического питания источников постоянного тока и дальнейшего создания разницы электрических потенциалов, наложенных на систему мембрана–раствор в электронанофильтрационных аппаратах. Таким образом, разработанная схема очистки технологических растворов гальванических производств (различные варианты) от тяжелых металлов с применением мембран позволит решить научную и практическую проблему по утилизации потока ретентата после проведения процесса нанофильтрационного разделения на промежуточной стадии представленной схемы.

Полученные результаты по разделению стоков гальванических производств на предприятии АО «Завод Тамбовполимермаш» и АО «ТАГАТ» имени С. И. Лившица внедрены для проектирования и расчета конструкций аппаратов, используемых при модернизации технологической схемы очистки промышленных стоков гальванических производств.

Список использованных источников

1. Применение процессов комбинированной обработки технологических растворов гальванических производств / О. А. Ковалева, Р. В. Попов, С. И. Лазарев, С. В. Ковалев // Системы обеспечения техносферной безопасности : материалы III Всерос. конф. и школы для молодых ученых. – Таганрог : ЮФУ, 2016. – С. 58 – 60.
2. Павлов, Д. В. Очистка сточных вод различных производств с применением наилучших доступных технологий / Д. В. Павлов, В. А. Колесников // Чистая вода: проблемы и решения. – 2010. – № 3. – С. 74 – 78.
3. Селиванов, Н. В. Утилизация отходов гальванического производства / Н. В. Селиванов, Т. А. Трифонова, Л. А. Ширкин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1(8). – С. 2085 – 2088.
4. Свитцов, А. А. Введение в мембранную технологию / А. А. Свитцов. – М. : ДеЛипринт, 2007. – 208 с.
5. Слесаренко, В. Н. Опреснение морской воды / В. Н. Слесаренко. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 278 с.
6. А. с. № 1681926 СССР, МПК В 01 D 61/14, В 01 D 61/42. Мембранный аппарат / С. И. Лазарев, В. Б. Коробов, В. И. Коновалов (СССР). – № 4696715 ; заявл. 24.05.1989 ; опубл. 07.10.1989, Бюл. № 37. – 5 с. : ил.

О. А. Милосердов, М. В. Губко

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

КЛАССИФИКАЦИЯ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛИМЕРОВ ПО ТРАНСПОРТНЫМ СВОЙСТВАМ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПОЛИМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

Аннотация. Представлен метод классификации конформаций полимеров, в основе которого лежит расчет площадей поверхности обкатки по Ли-Ричардсу для базы конформаций отдельных полимерных цепей и в построении на их основе кривых зависимости площадей обкатки от радиуса обкатки, коэффициенты линейной аппроксимации которых используются в качестве переменных для агломеративного метода кластеризации.

O. A. Miloserdov, M. V. Goubko

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia)

CLASSIFICATION OF GLASSY POLYMERS BY TRANSPORT PROPERTIES BASED ON THE LOCAL GEOMETRY OF POLYMER CHAINS

Abstract. Presents a method for classifying polymer conformations, based on the calculation of the Lee-Richards accessible surface area for the base of conformations of individual polymer chains and on the basis of these curves for plotting the accessible surface areas on the probe radius, the linear approximation coefficients of which are used as variables for the agglomerative clustering method.

Задачи предсказания физико-химических свойств веществ являются неотъемлемой частью общей фундаментальной проблемы – получения материалов с заданными свойствами. В работе [1] авторами был разработан, а в работе [2] улучшен метод предсказания сорбционных параметров полимеров. Для коэффициента растворимости газов при бесконечном разбавлении S коэффициент детерминации (скорректированный R^2) регрессии на тестовой выборке равен 0,8 (что соответствует средней относительной ошибке 77% предсказания S), для константы растворимости закона Генри k_D модели двойной сорбции коэффициент детерминации равен 0,81, средняя относительная ошибка 47%. Таким образом, метод позволяет предсказывать с хорошей точностью сорбционные параметры легких газов в стеклообразных полимерах различной химической структуры.

В докладе представлен метод классификации конформаций полимеров, используемых в мембранном газоразделении. В основе данного метода, как и в основе подхода [1, 2], лежит вычисление зависимости ряда геометрических индексов от эффективного радиуса пенетранта для конформаций отрезка полимерной цепи размером 200 – 600 атомов, полученных из молекулярно-динамической модели.

В качестве исследуемой выборки были взяты 111 полимеров различных классов из базы данных физико-химических свойств полимеров Лаборатории мембранного газоразделения ИНХС им. А. В. Топчиева [3]. Для каждого из них в среде Python было рассчитаны усредненные по шести конформациям отрезка полимерной цепи зависимости площади доступной поверхности, площади доступной поверхности с положительным и отрицательным частичным зарядом и ряда других индексов из работы [2] от «радиуса обкатки» R . Эти зависимости были параметризованы (методом наименьших квадратов) линейными функциями на отрезке $R = [2,2; 2,6]$. Параметры линеаризаций сформировали 17-мерное пространство действительных признаков, характеризующих полимеры. В этом пространстве и проводилась кластеризация полимеров.

Для кластеризации полимеров был использован агломеративный метод (разновидность иерархической классификации) [4], при этом полимеры делились на шесть кластеров. Результирующие кластеры содержат от 2 до 36 полимеров. В один кластер отбираются полимеры, обладающие схожей формой полимерной цепи. Кластеры формируются в основном из полимеров одного класса, но не только: так, ТМРС попал в класс 6, состоящий в основном из полиимидов, также класс 1 содержит почти все исследуемые в данном докладе химические классы полимеров.

Выделенные кластеры оказываются тесно связанными с физико-химическими свойствами веществ, важными для мембранной технологии. Так, ранее в работе [2] была предложена формула для предсказания растворимости S (при бесконечном разбавлении) легкого газа g в стеклообразном полимере p :

$$\lg S(g, p) = a(p) + b(p)MaxPA(g), \quad (1)$$

где $MaxPA(g)$ – максимальная площадь проекции молекулы газа g ; $a(p)$ и $b(p)$ – коэффициенты, зависящие от полимера p .

В работе [2] показано, что эта формула позволяет предсказывать растворимость для стеклообразных полимеров разных классов с относительной ошибкой 77%. При этом большее значение коэффициента $a(p)$ говорит о том, что полимер имеет большую растворимость для всех газов-пенетрантов, а увеличение абсолютной величины коэффициента $b(p)$ говорит о большей селективности растворимости по отношению к разным газам-пенетрантам, имеющим различную площадь проекции $MaxPA(g)$.

На рисунке 1 полученные кластеры полимеров изображены в координатах $a(p)$, $b(p)$. Эта диаграмма имеет примерно такой же смысл, что диаграмма Робсона для растворимости по паре газов, но имеет более общий характер. Из рисунка видно, что полимеры разных кластеров образуют группы вблизи кривой Робсона, каждый кластер характеризуется схожими параметрами растворимости и селективности растворимости.

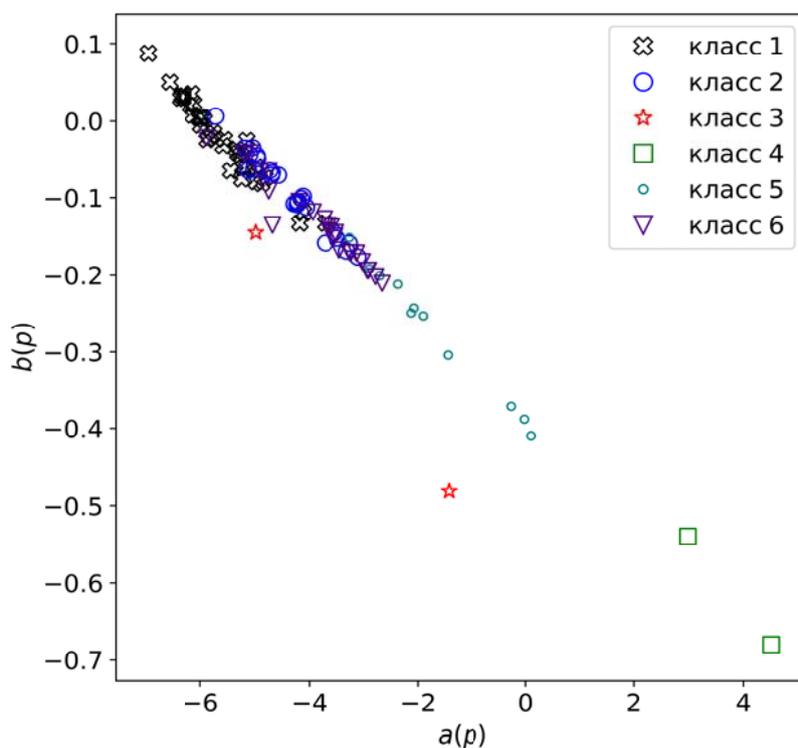


Рис. 1. Кластеры полимеров в координатах $a(b)$, $b(p)$

Милосердов О. А. выражает благодарность за финансовую поддержку Российскому фонду фундаментальных исследований в рамках научного проекта 18-37-00265.

Список использованных источников

1. Goubko M., Miloserdov O., Yampolskii Yu., Alentiev A., Ryzhikh V. // J. PolymerSci. Part B: PolymerPhys. – 2016. – V. 55, № 3. – P. 228 – 244.
2. Губко М. В., Милосердов О. А., Ямпольский Ю. П., Рыжих В. Е. // Высокомолекулярные соединения, 2019 (в печати).
3. Alentiev A., Yampolskii Yu., Ryzhikh V., Tsarev D. // Petroleum Chem. – 2013. – V. 53. – P. 554 – 560.
4. Scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.Agglomerative Clustering.html (дата обращения: 30.06.2019).

К. В. Шестаков, С. И. Лазарев, П. А. Хохлов
(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия)

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ
МЕМБРАННЫХ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ РАСТВОРОВ И СТОКОВ**

Аннотация. Данная работа посвящена системе управления технологической эффективностью мембранных процессов очистки с программным комплексом, способным прогнозировать изменения значений фрикционных коэффициентов и кинетических характеристик мембранного разделения промышленных растворов и стоков с течением времени.

K. V. Shestakov, S. I. Lazarev, P. A. Khokhlov
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

**TECHNOLOGICAL EFFICIENCY MANAGEMENT
OF MEMBRANE PROCESSES FOR TREATMENT
OF INDUSTRIAL SOLUTIONS AND DRAINS**

Abstract. This work is devoted to the control system of technological efficiency of membrane cleaning processes with a software package that can predict changes in the values of friction coefficients and kinetic characteristics of membrane separation of industrial solutions and effluents over time.

Системы управления технологическим процессом представляют собой мощный инструмент, направленный на совершенствование имеющихся технологий и операций в процессах производства продукции либо в процессах очистки промышленных растворов и сточных вод [1, 2]. Технологические линии на определенных производствах химического машиностроения сопровождаются образованием большого количества промышленных растворов и стоков, которые содержат как вредные, так и ценные для производства вещества, например цветные металлы. Поэтому контроль и управление процессами очистки, в частности и мембранными, играют важную роль в промышленном производстве.

На рисунке 1 представлена стандартная схема управления технологическим процессом, которая применима для мембранных процессов очистки промышленных растворов и стоков.

Главным отличием предлагаемой в работе системы управления технологической эффективностью мембранных процессов очистки является разрабатываемый в данный момент программный комплекс, способный прогнозировать изменения значений фрикционных коэффициентов, а вследствие этого и кинетических характеристик мембранного разделения промышленных растворов и стоков с течением времени.

тических характеристик мембранного разделения промышленных растворов и стоков с течением времени. Полученные данные можно будет использовать как для непосредственного управления работой промышленных установок, так и для оценки требуемых в частных случаях производственных мощностей.

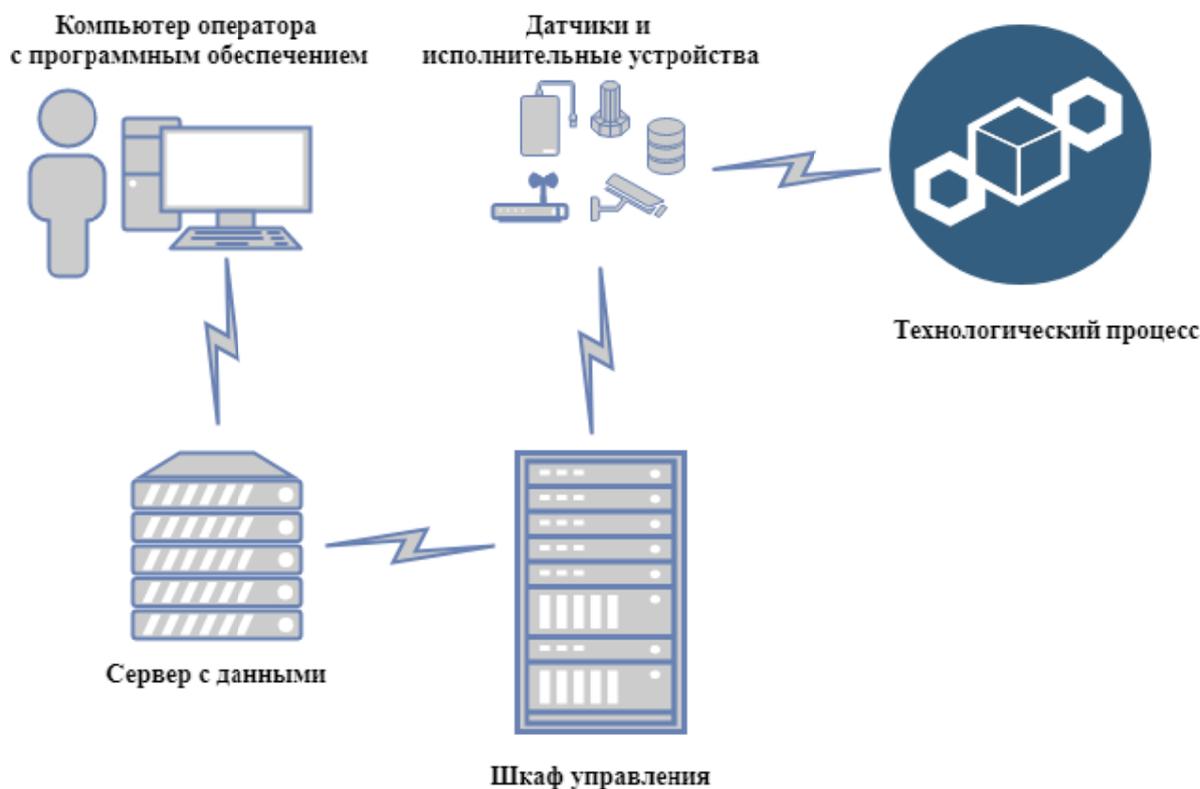


Рис. 1. Схема управления технологическим процессом

Теоретический расчет и прогнозирование фрикционных и кинетических коэффициентов основаны на методиках, предложенных в работах [3, 4]. На рисунке 2 показана блок-схема, описывающая общие этапы расчетов фрикционных коэффициентов. К основным этапам относятся ввод снятых датчиками рабочих параметров технологического процесса непосредственно при осуществлении мембранной очистки, расчет дискретных значений фрикционных коэффициентов и аппроксимация данных значений. Дальнейший расчет сводится к решению обратной задачи по нахождению необходимых кинетических параметров, применяя выбранные ранее рабочие параметры эксперимента и необходимое время проведения эксперимента, либо другой не являющийся константой параметр, оказывающий влияние на массоперенос ионов через мембраны.

Вывод. В работе представлена разрабатываемая система управления технологической эффективностью мембранных процессов очистки с программным комплексом, способным прогнозировать изменения значений фрикционных коэффициентов и кинетических характеристик мембранного разделения промышленных растворов и стоков с течением времени.

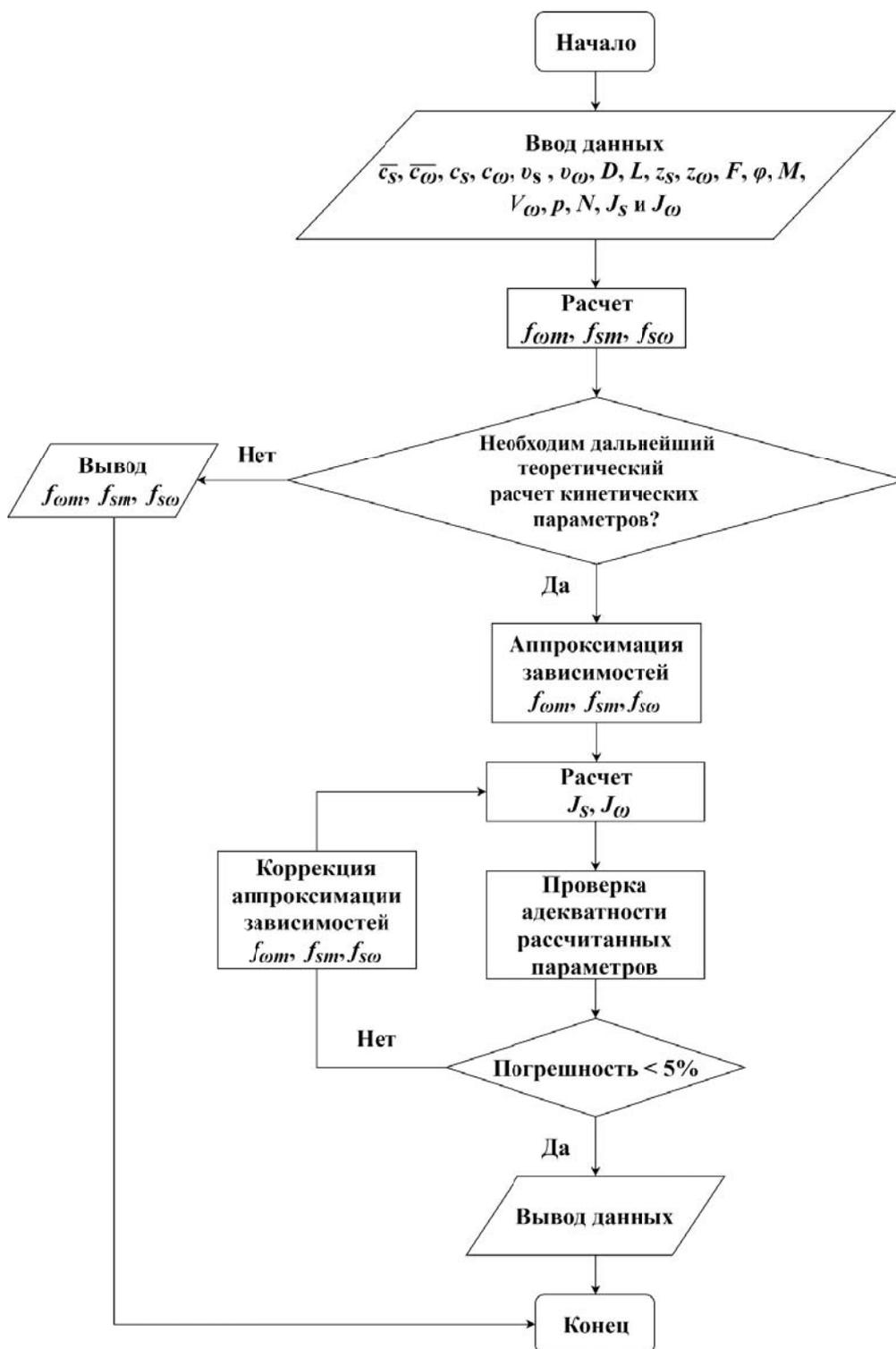


Рис. 2. Блок-схема расчета фрикционных коэффициентов

Список использованных источников

1. Интегрированная система автоматизации проектирования технологических процессов и оперативного управления производством / Г. Б. Евгеньев, С. С. Крюков, Б. В. Кузьмин, А. Г. Стисес // Известия вузов. Машиностроение. – 2015. – № 3(660). – С. 49 – 60.

2. Павлов, В. А. Программно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы управления технологическими процессами с заданными параметрами продукта / В. А. Павлов, Т. Нийонсаба // Программные продукты и системы. – 2018. – № 1. – С. 140 – 144.

3. Методика прогнозирования и расчета фрикционных коэффициентов и кинетических характеристик электродиализного разделения промышленных растворов, содержащих ионы никеля / К. В. Шестаков, С. И. Лазарев, А. А. Арзамасцев, П. А. Хохлов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2019. – № 6. – С. 10 – 13.

4. Modelling of substance interactions in electrochemical membrane processes by basis of the friction theory / K. I. Kiselyov, K. V. Shestakov, I. V. Horohorina, O. A. Abonosimov, S. I. Lazarev // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – V. 1278. – P. 1 – 6.

С. А. Скворцов¹, С. С. Толстошеин²

(¹ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия;

² ООО «Системы моделирования», Тамбов, Россия)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В СИСТЕМЕ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Аннотация. Поставлена задача управления циклическим процессом адсорбционного концентрирования углекислого газа в системе жизнеобеспечения в замкнутом объеме, а также приведено описание реализации системы управления для решения данной задачи.

S. A. Skvortsov¹, S. S. Tolstoshein²

(¹ Tambov State Technical University, Tambov, Russia;

² LLC “Systems Modeling”, Tambov, Russia)

CONCENTRATION MANAGEMENT SYSTEM CARBON GAS IN THE LIFE SYSTEM IN CONFINED SPACES

Abstract. The task of controlling the process of adsorption concentration of carbon dioxide in the life support system in confined spaces is formulated, and a description of the implementation of the control system for solving this problem is given.

Обеспечение физиологических норм дыхания персонала в замкнутом объеме на длительных этапах автономного пребывания является одной из важнейших задач в системе жизнеобеспечения (СЖО). Концентрирование углекислого газа в потоке, забираемого из среды обитания человека, позволяет решить данную задачу. Применение циклических адсорбционных процессов является

наиболее эффективным и целесообразным способом для концентрирования углекислого газа. Технологическая схема процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа в СЖО приведена на рис. 1.

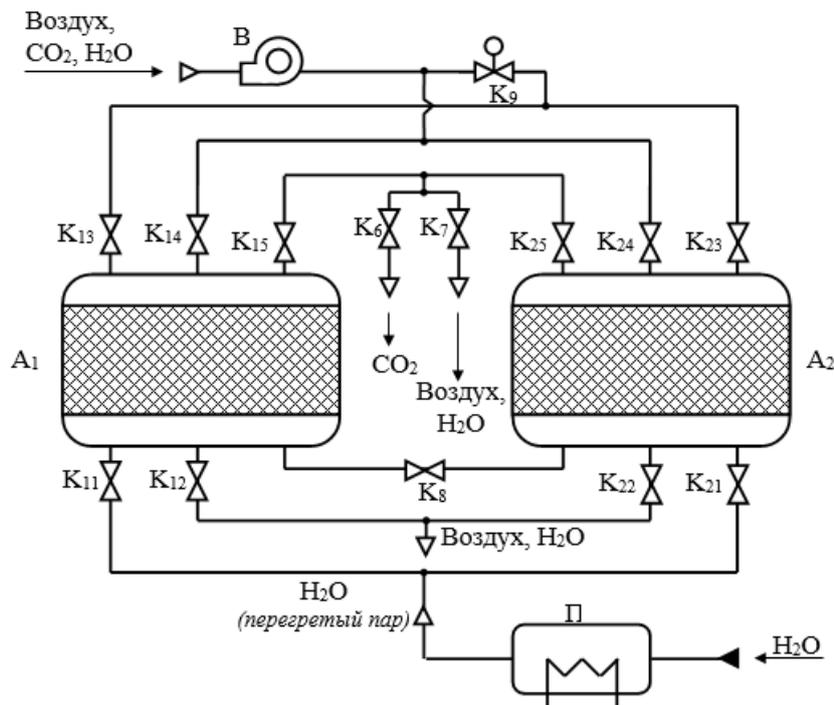


Рис. 1. Технологическая схема процесса концентрирования углекислого газа:
 А – адсорбер; К – клапан; В – вентилятор; П – парогенератор

Характер выполняемых работ персоналом в среде обитания определяет интенсивность выделения им углекислого газа, который задает наличие различных состояний функционирования для системы жизнеобеспечения. Применение жестких алгоритмов управления этой системой приводит к перерасходу ее энергетических ресурсов, что является весьма критичным на длительном этапе автономного пребывания человека. В связи с этим возникает необходимость создания такой системы управления, которая реализует оптимальное, в смысле минимизации энергозатрат, управление для сменяющихся состояний функционирования.

Из характера протекания циклического процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа следует, что необходимо решить следующую задачу управления: необходимо в заданном диапазоне возмущающих воздействий, а именно: температура газовой смеси в среде обитания $T^{oc}(\tau)$; состав газовой смеси в среде обитания $c^{oc}(\tau)$; напряжение в системе энергоснабжения $U(\tau)$, определить такой вектор управления $\mathbf{U} = \{\mathbf{u}, \psi_9, r^{\text{П}}, r^{\text{В}}\}$, при котором

$$E = \min_{\mathbf{U}} \left(\left(\int_0^{\tau_{\max}} P(\mathbf{U}) dt \right) / \left(\int_0^{\tau_{\max}} (G^{\text{ВЫХ}}(\mathbf{U}) c_1^{\text{ВЫХ}}(\mathbf{U})) dt \right) \right) \quad (1)$$

с учетом технологических ограничений:

а) концентрация углекислого газа

$$c_1^{\text{ВЫХ}1} \geq c_{1\text{min}}^{\text{ВЫХ}1};$$

б) влажность концентрированной газовой смеси

$$c_2^{\text{ВЫХ}1} \leq c_{2\text{max}}^{\text{ВЫХ}1};$$

в) остаточная концентрация углекислого газа в очищаемом воздухе

$$c_1^{\text{ВЫХ}3} \leq c_{1\text{max}}^{\text{ВЫХ}3};$$

г) мгновенная потребляемая мощность установки

$$P \leq P_{\text{max}};$$

д) температура греющего пара

$$T_{\text{Пmin}} \leq T_{\text{П}} \leq T_{\text{Пmax}};$$

е) производительность установки концентрирования углекислого газа по концентрированной газовой смеси

$$G_{\text{min}}^{\text{ВЫХ}1} \leq G^{\text{ВЫХ}1} \leq G_{\text{max}}^{\text{ВЫХ}1};$$

ж) расход очищаемого воздуха

$$G_{\text{Bmin}} \leq G_{\text{B}} \leq G_{\text{Bmax}}.$$

Компоненты вектора управляющих воздействий $\mathbf{U} = \{\mathbf{u}, \psi_9, r^{\text{П}}, r^{\text{В}}\}$ разделяем на два типа: $r^{\text{П}}$ (электрическое сопротивление парогенератора), $r^{\text{В}}$ (электрическое сопротивление вентилятора); ψ_9 (степень открытия клапана) – параметры, изменение которых может осуществляться непрерывно; \mathbf{u} – циклограмма переключения клапанов.

Вышеуказанная задача управления не может быть решена в описанном виде, так как не известны заранее: характер тепловыделений, определяющий температуру в объеме обитания $T^{\text{OC}}(\tau)$; характер выделения углекислого газа $c_1^{\text{OC}}(\tau)$ и паров воды $c_2^{\text{OC}}(\tau)$ в объеме обитания; колебания напряжения в сети питания $U(\tau)$. В связи с этим исходную задачу декомпозируем на внешнюю и внутреннюю.

Внешняя задача. Необходимо определить циклограмму переключения клапанов \mathbf{u} при некоторых наиболее вероятных значениях: состав газовой смеси $\mathbf{c}^{\text{OC}}(\tau)$ в среде обитания, температура газовой смеси $T^{\text{OC}}(\tau)$ в среде обита-

ния, напряжение $U(\tau)$ в системе энергоснабжения и заданных значениях: электрическое сопротивление парогенератора и вентилятора, степень открытия регулирующего клапана, чтобы выполнялись технологические условия.

Внутренняя задача. Для отклонений: состава газовой смеси в среде обитания $\Delta c_1^{oc}(\tau) = c_1^{oc}(\tau) - \hat{c}_1^{oc}(\tau)$ и $\Delta c_2^{oc}(\tau) = c_2^{oc}(\tau) - \hat{c}_2^{oc}(\tau)$, температуры газовой смеси в среде обитания $\Delta T^{oc}(\tau) = T^{oc}(\tau) - \hat{T}^{oc}(\tau)$, напряжения в системе энергоснабжения $\Delta U(\tau) = U(\tau) - \hat{U}(\tau)$ от наиболее вероятных значений и найденной циклограммы переключения клапанов **и** необходимо найти значения сопротивления парогенератора и вентилятора, степень открытия регулирующего клапана, корректирующие решение внешней задачи, такие, чтобы выполнялся критерий (1) с учетом технологических ограничений.

Структура комплекса технических средств системы управления процессом адсорбционного концентрирования углекислого газа в СЖО замкнутого объема, обеспечивающая минимизацию удельного энергопотребления на длительном этапе ее функционирования, когда происходит многочисленная смена состояний функционирования, предусматривается двухуровневой [1].

Верхний уровень строится на основе SCADA-системы, на который поступают данные по: протеканию процесса; концентрации углекислого газа; расходу воздуха, насыщенного парами воды и углекислым газом; текущей температуре пара на выходе из парогенератора; состояния клапанов и другие.

На нижнем уровне располагаются датчики, запорная арматура и контроллер.

Система управления процессом адсорбционного концентрирования углекислого газа строится на базе непрерывно-дискретной модели и включает в себя один контроллер, и обеспечивает управление данным процессом, а также осуществляет по независимым контурам регулирования следующие функции:

- регулировать концентрацию по заданной во времени программе;
- корректировать продолжительность работы установки адсорбционного концентрирования углекислого газа;
- сигнализировать с помощью световой и звуковой сигнализации о неисправностях системы регулирования;
- пускать, останавливать, сбрасывать программу изменения концентрации с помощью клавиш лицевой панели микроконтроллера;
- контролировать процесс.

Система может осуществлять по каждому независимому контуру следующие функции:

- автоматически управлять процессом адсорбционного концентрирования углекислого газа;
- оперативно управлять технологическим процессом с помощью клавиш лицевой панели контроллера, т.е. изменять задание регулятору в ручном или автоматическом режиме;

- контролировать по монитору: рассогласование между заданием и фактическим значением сигнала; режим управления (автоматический или ручной) и режим задания (программный или ручной).

Данная система управления обеспечивает энергоэкономичные режимы управления. Предусматриваемое проектное решение обеспечивает высокую воспроизводимость законов управления, высокую надежность, простоту в обслуживании технических средств автоматизации.

Список использованных источников

1. Толстошеин, С. С. Математическое моделирование и управление процессом адсорбционного концентрирования углекислого газа : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / С. С. Толстошеин. – Тамбов, 2011. – 174 с.

М. Р. Дабас, М. Н. Орешина

(ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
Липецк, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАБОЧИХ ВАЛКАХ СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Аннотация. Рассматривается процесс охлаждения рабочих валков при горячей прокатке. Приводятся модели, учитывающие особенности зон пассивного и активного охлаждения по периметру валка. На основе полученных моделей разработано программное обеспечение для расчета температуры валков.

M. R. Dabas, M. N. Oreshina

(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

MATHEMATICAL MODELING OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN WORKING ROLLS FOR A HOT ROLLING MILL

Abstract. The cooling process of work rolls during hot rolling is considered. We present the models taking into account the specific of passive and active cooling zones on the roll perimeter. Based on the obtained models, software was developed for calculating the temperature of the rolls.

Постановка задачи. При моделировании температурных режимов горячей прокатки важной задачей является учет особенностей охлаждения рабочих валков [1]. Схема рассматриваемых зон охлаждения представлена на рис. 1. Информация о характеристиках каждой зоны (расположение спрейерных форсунок, углы раскрытия струй, плотность орошения, расположение отсекаелей

и т.д.) позволяет рассчитать тепловые потоки на поверхности для составления граничных условий по периметру валка.

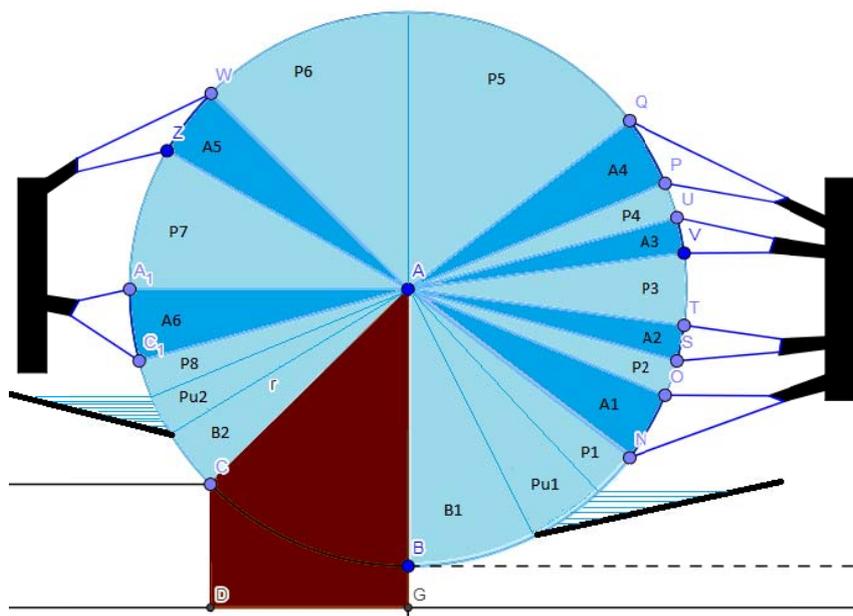


Рис. 1. Разделение на зоны активного и пассивного охлаждения

Зоны A1, A2, A3, A4, A5, A6 являются зонами активного охлаждения, в которых вода из форсунок попадает непосредственно на поверхность валка.

Зоны P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 являются зонами пассивного охлаждения, где вода стекает по периметру валка. Зоны Pu2 и Pu1 представляют собой так называемые «водяные ванны» над отсекателями воды. Эти ванны образуются вследствие накопления воды, стекающей из зон активного охлаждения. Зоны B1, B2 – зоны под отсекателями воды.

Для упрощения модели сведем задачу о распространении тепла в валке к одномерной задаче о нагреве стержня длиной R с граничным условием второго рода:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - a \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} &= 0, & t > t_0, & r \in [0, R], \\ \lambda \frac{\partial u}{\partial r}(t, R) &= -kq(t), & t > t_0, & \\ \frac{\partial u}{\partial r}(t, 0) &= 0, & t > t_0, & \\ u(t_0, r) &= C_3(r), & r \in [0, R], & \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь R – радиус валка; t_0 – момент выхода из очага деформации; C_3 – распределение температуры по глубине валка на выходе из очага деформации (по радиусу AB); a – коэффициент температуропроводности валка; λ – коэффициент теплопроводности; q – тепловой поток.

Для учета вращения вала (против часовой стрелки) будем считать, что один конец стержня закреплен в точке A (центр вала, см. рис. 1), а второй вращается с угловой скоростью ω . При этом тепловой поток q в граничном условии в зависимости от текущего значения времени должен учитывать характеристики текущей зоны охлаждения. Пусть φ – угол между текущим положением стержня и радиусом AC . Сделаем в задаче (1) замену $\varphi = t\omega$ с учетом $\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial \varphi} \omega$, в результате получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{a}{\omega} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} &= 0, & \varphi > \varphi_m, & \quad r \in [0, R], \\ \lambda \frac{\partial u}{\partial r}(\varphi, R) &= -kq(\varphi), & \varphi > \varphi_m, & \\ \frac{\partial u}{\partial r}(\varphi, 0) &= 0, & \varphi > \varphi_m, & \\ u(\varphi_m, r) &= C_3(r), & r \in [0, R]. & \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь φ_m – угол, соответствующий выходу из очага деформации (между радиусами AC и AB). Расчетные формулы для теплового потока q различаются в зависимости от зоны охлаждения.

Тепловой поток в зонах под отбойниками В1 и В2. Тепловой поток в зонах под отбойниками учитывает излучение тепла, получаемого от полосы, и охлаждение водой:

$$q(\varphi) = \alpha_{conv} \cdot (u(\varphi, R) - T_B) + \alpha'_{rad} \cdot (u^4(\varphi, R) - T_c^4). \quad (3)$$

Здесь T_c – усредненная температура по глубине полосы; T_B – температура воды.

Второе слагаемое в правой части имеет высокую степень, что затрудняет переход к численному решению. Однако его можно преобразовать следующим образом [2]:

$$\alpha'_{rad} (u^4(\varphi, R) - T_c^4) = \alpha_{rad} (u(\varphi, R) - T_c), \quad (4)$$

где приведенный коэффициент теплопередачи для зон под отбойниками

$$\alpha_{rad} = C_{rad} (u(\varphi, R) + T_c + 546) ((u(\varphi, R) + 273)^2 + (T_c + 273)^2) \cos \theta_j, \quad (5)$$

θ_j – средний угол между поверхностями полосы и вала под отсекателем;

$$C_{rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_{Eq}} - 1}; \quad \sigma - \text{постоянная Стефана–Больцмана}; \quad \varepsilon_{Eq} - \text{степень черноты}$$

полосы; ε_s – степень черноты окружающей среды.

Для построения численного решения можно [2] в формуле (5) приближенно заменить неизвестную величину u в правой части на усредненную по глубине валка температуру.

Тепловой поток в зонах активного охлаждения А1 – А6. Тепловой поток в зонах активного охлаждения А1 – А6 учитывает только охлаждение водой:

$$q(\varphi) = \alpha_{conv} \cdot (u(\varphi, R) - T_B).$$

Для расчетов коэффициентов теплообмена в зонах активного охлаждения используется зависимость, основанная на [3]

$$\alpha_{conv} = 190 + th \frac{qc}{8} \cdot \left(140qc - \frac{140q_C^2 \cdot \Delta T}{72000} + 3,26 \cdot \Delta T^2 \left(1 - th \frac{\Delta T}{128} \right) \right),$$

где ΔT – разница температур охлаждаемой поверхности (на входе в зону) и воды; q_C – плотность орошения поверхности.

Тепловой поток в зонах «ванн» Рu1, Рu2. Тепловой поток в зонах пассивного охлаждения Р1 – Р8 учитывает охлаждение водой:

$$q(\varphi) = \alpha_{conv} \cdot (u(\varphi, R) - T_B).$$

В зонах пассивного охлаждения вода стекает по поверхности валка, вследствие чего коэффициент теплообмена можно выразить из критериального уравнения теплообмена плоской поверхности и турбулизированной жидкости при вынужденной конвекции [4]. Тогда коэффициент теплопередачи для зон пассивного охлаждения Р1 – Р8 и зон ванн Рu1, Рu2

$$\alpha_{conv} = 0,0296 V^{\frac{4}{5}} x^{-\frac{1}{5}} v^{-\frac{7}{15}} (\rho c)^3 \lambda^3 K_{flow}.$$

Здесь x – длина зоны охлаждения; V – скорость валка относительно воды для зон пассивного охлаждения; λ – коэффициент теплопроводности воды; v – кинематическая вязкость воды; ρ – плотность воды; c – теплоемкость воды; K_{flow} – экспериментальный коэффициент, характеризующий форму течения жидкости.

Тепловой поток в зонах пассивного охлаждения Р1 – Р8. Модели расчета теплового потока и коэффициента теплоотдачи для зон пассивного охлаждения Р1 – Р8 аналогичны предыдущему пункту. Однако в качестве V необходимо использовать скорость жидкости относительно охлаждаемой поверхности. Для расчета V можно использовать формулу $V = |v_B \pm v_g|$, где v_B – скорость валка; $v_g = \sqrt{2gR}$ – скорость течения воды; g – ускорение свободного падения.

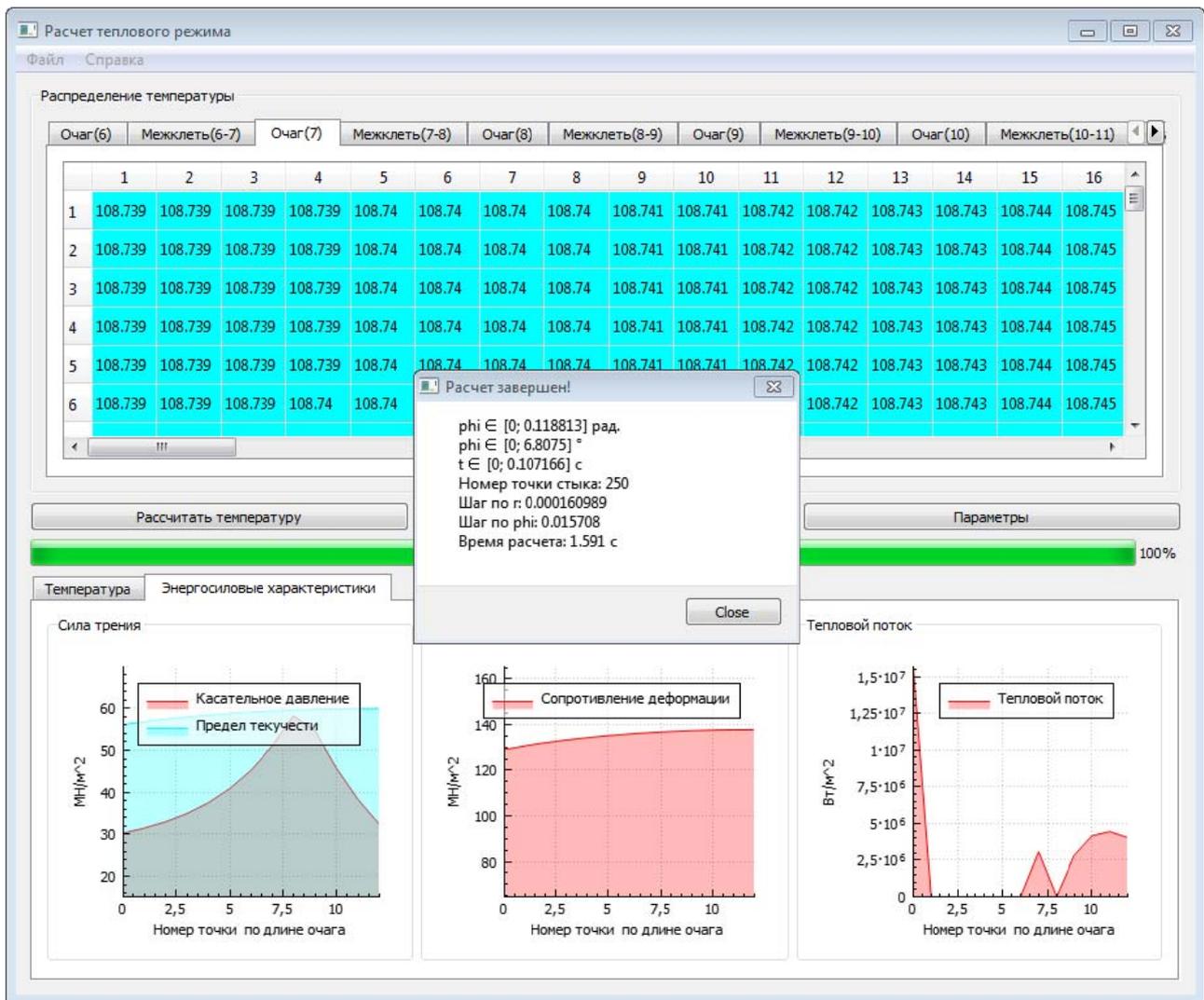


Рис. 2. Главное окно программы

Программное обеспечение. Разработана программа для расчета температуры по глубине валков и полосы в чистой группе клеток стана 2000. Для расчета распределения температур по глубине валков вне очага деформации в программе реализовано численное решение задачи (2) с помощью конечно-разностной аппроксимации. В очаге деформации использованы модели, приведенные в работе [5], а расчет температуры полосы в межклетевых промежутках основан на работе [6].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта 19-48-480009-р_а.

Список использованных источников

1. Пименов, В. А. Анализ особенностей охлаждения рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки / В. А. Пименов, А. К. Погодаев, Д. А. Ковалев // Производство проката. – 2018. – № 8. – С. 11 – 18.

2. Самарский, А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
3. Spray water cooling heat transfer under oxide scale formation conditions / R. Viscorova, R. Scholz, K.-H. Spitzer, J. Wendelstorf // Advanced Computational Methods in Heat Transfer IX. – 2006. – P. 163 – 172.
4. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справочное пособие / С. С. Кутателадзе. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
5. Ветчинкин, М. А. Математическое моделирование тепловых режимов горячей прокатки / М. А. Ветчинкин, М. Н. Орешина // Автоматизация и информатика. Тенденции развития современной науки : материалы научной конференции студентов и аспирантов ЛГТУ. – 2018. – С. 37 – 39.
6. Дабас, М. Р. Математическое моделирование теплового режима полосы на межклетевом промежутке при горячей прокатке : сб. материалов Шестнадцатой Всерос. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов / М. Р. Дабас. – 2019. – С. 258 – 260.

В. А. Кербель, М. А. Ложкин, А. А. Третьяков
(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА ПИГМЕНТА КРАСНОГО

Аннотация. В работе рассматривается подход к построению многоуровневой автоматизированной системы управления технологическим процессом производства пигмента красного «Ж». Представлена структура АСУ ТП, построенной с использованием современных программных и технических средств автоматизации.

V. A. Kerbel, M. A. Lozhkin, A. A. Tretyakov
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

CONTROL SYSTEM THE PROCESS OF PRODUCTION OF PIGMENT RED

Abstract. The paper considers the approach to building a multi-level automated control system for the technological process of production of red pigment “Zh”. The structure of process control systems constructed using modern software and hardware automation is presented.

Пигменты широко применяются для различных отраслей промышленности – производства лакокрасочных материалов (водных, алкидных, порошковых красок), пластмасс (для полиэтилена, ПВХ, полистирола, резины), полиграфических красок, средств защиты растений и др. Спрос на отечественные

пигменты в последнее время значительно возрос в связи с отказом от импортных аналогов в условиях импортозамещения.

Пигмент красного «Ж» используется в лакокрасочной промышленности для изготовления малярных красок общего назначения, художественных красок, а также для производства алкидных эмалей.

Процесс производства пигмента красного «Ж» относится к сложным многостадийным технологическим процессам. Поддержание технологических параметров в рамках заданных диапазонов, в условиях совокупности возмущающих внешних воздействий возможно только посредством высокоэффективных систем автоматического управления.

Эффективное решение данной задачи возможно только при использовании современных средств управления и принципов построения автоматизированных систем.

В отличие от непрерывных объектов (пусть достаточно сложных, многосвязных), для которых в большинстве случаев достаточно применения относительно простых ПИД- и ПИ-законов управления, для аппаратов периодического действия даже в очень простых случаях от системы требуется более «интеллектуальная» деятельность. Например, в точно заданные моменты времени необходимо открыть клапан, проверить действительно ли он откроется, выждать заданное время, закрыть этот клапан, проверить действительно ли он закрыт, открыть другой и т.п. Уже в этом случае от системы требуется предпринять нестандартные действия в случае несрабатывания исполнительного механизма.

Нестационарность процесса производства пигмента красного «Ж» порождает серьезные трудности при регулировании (необходимость адаптации, переменной структуры регулятора). Использование локальных типовых регуляторов не позволяет эффективно решить задачу программного регулирования температуры как на стадии сульфирования, так и на стадии поликонденсации.

Обработка больших данных о ходе технологического процесса, реализация нетиповых алгоритмов регулирования, а также логико-программное управление аппаратами и агрегатами и реализация функций технологических блокировок и противоаварийных защит возможна только при использовании производительного программируемого промышленного контроллера (ПЛК).

В качестве базового контроллера при построении системы управления был выбран промышленный контроллер ПЛК-160 производства отечественной компании «ОВЕН». ПЛК-160 выполнен в полном соответствии со стандартом ГОСТ Р 51840–2001 (IEC 61131-2), что обеспечивает высокую аппаратную надежность.

Контроллер обладает развитыми сетевыми возможностями: 2 порта RS-485, 2 порта RS-232, 1 порт Ethernet, поддерживает различные протоколы обмена: ОВЕН, Modbus RTU/ASCII, Modbus TCP, DCON. Имеется возможность написания и использования нестандартных протоколов обмена.

АСУ ТП производства пигмента красного «Ж» строится как иерархическая многоуровневая система, в которой можно выделить уровень датчиков и исполнительных механизмов (нижний уровень), уровень программируемых логических контроллеров (средний уровень) и операторский (верхний) уровень [1].

При этом структура комплекса технических средств (КТС) представлена на рис. 1. Комплекс технических средств включает два щита управления с контроллерами ПЛК-160 и модулями аналогового и дискретного ввода-вывода серии Mx110 той же компании «ОВЕН». Кроме них в щитах управления установлены блоки питания 24 В, промежуточные реле (ПР) компании Finder, автоматические выключатели и предохранители. Кроме этого, для контроля за ходом технологического процесса и оперативного управления по месту в щитах управления установлены панельные программируемые контроллеры ОВЕН СПК110.

Электропитание оборудования щитов, а также АРМ оператора осуществляется через источник бесперебойного питания Smart-UPS, который помимо фильтрации сетевых помех обеспечивают работу системы управления в течение 1 часа после отключения электропитания.

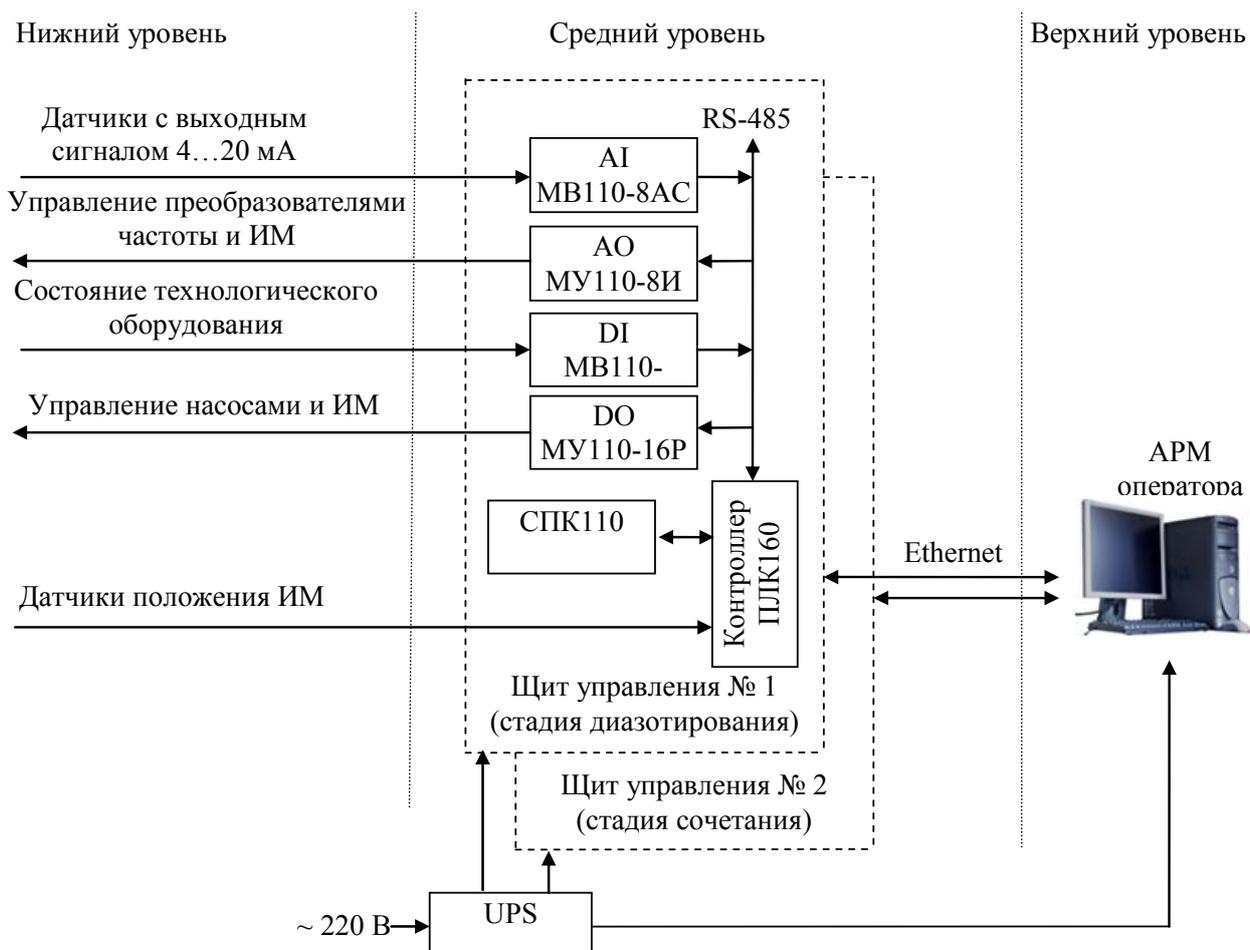


Рис. 1. Структура КТС АСУ ТП:

AI – модули аналогового ввода; АО – модули аналогового вывода;
 DI – модули дискретного ввода; DO – модули дискретного вывода;
 UPS – бесперебойный источник питания; ИМ – исполнительные механизмы

Нижний уровень системы управления образуют датчики и исполнительные механизмы.

На среднем уровне системы управления расположены ПЛК. ПЛК в системе управления выполняют: сбор сигналов от датчиков; предварительную обработку сигналов; реализацию алгоритмов управления и формирование управляющих сигналов на исполнительные механизмы объекта управления; прием и передачу информации из сети. При разработке прикладного программного обеспечения для контроллеров следует руководствоваться международным стандартом на языки программирования контроллеров IEC – 61131-3.

Верхний уровень управления реализован в виде автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора с использованием SCADA «КРУГ-2000» [2].

АРМ оператора, как правило, представляет собой PC совместимый промышленный компьютер с операционной системой семейства Windows, при этом стандартным механизмом взаимодействия программного обеспечения АСУ ТП признан стандарт OPC (OLE for Process Control), который основан на объектной модели COM/DCOM фирмы Microsoft.

SCADA-системы реализуют все основные функции визуализации измеряемой и контролируемой информации, выделение аварийных и предаварийных ситуаций, передачи данных и команд на нижний уровень системы управления [2]:

- сбор текущей информации от контроллеров, ее архивирование и хранение;
- представление текущей и исторической информации на дисплее в удобной для оператора форме (реализация динамизированных мнемосхем, таблиц, трендов);
- выделение внештатных ситуаций с автоматической генерацией сигналов тревоги;
- ввод и передачу команд оператора и настроечных параметров алгоритмов в контроллеры;
- регистрацию всех действий оператора (дистанционное открытие-закрытие клапанов, включение-выключение приводов насосов и мешалок, изменение настроечных параметров алгоритмов управления);
- защиту от несанкционированного доступа и предоставление различных прав пользователям во время работы с системой;
- автоматическое формирование отчетов о ходе проведения процесса, а также печать отчетов и протоколов по запросу оператора.

Следует отметить, что при создании современных АСУ ТП наблюдается тенденция к мировой интеграции и унификация технических решений на основе открытых стандартов в области автоматизации. Основное требование к современным АСУ ТП – это открытость системы. Система считается открытой, если для нее определены и описаны используемые интерфейсы и форматы дан-

ных, что позволяет подключать к ней «внешние» независимо разработанные компоненты.

Предложенный подход к построению системы управления технологическим процессом производства пигмента красного «Ж» с использованием современных открытых стандартов автоматизации позволит повысить экономическую и технологическую эффективность, а также безопасность данного производства.

Список использованных источников

1. Промышленные вычислительные сети : учебное пособие / И. А. Елизаров, П. М. Оневский, В. А. Погонин, А. А. Третьяков. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 152 с.

2. Интегрированные системы проектирования и управления. SCADA-системы : учебное пособие / И. А. Елизаров и др. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. – 160 с.

Д. М. Инютин, А. С. Сысоев

(ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
Липецк, Россия)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ КАК СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛЯ ГОРЯЧЕГО ПРОКАТА

Аннотация. Целью исследования является сравнение методов аппроксимации как средств моделирования геометрии профиля горячекатаной полосы. Для моделирования использованы численные значения толщины профилей, полученных при производстве горячего проката. В качестве методов аппроксимации рассмотрены ортогональные полиномы Чебышева и Форсайта.

D. M. Inyutin, A. S. Sysoev

(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROXIMATION METHODS AS TOOLS TO MODEL HOT ROLLED PRODUCTS PROFILE GEOMETRY

Abstract. The reported study presents a comparison of approximation methods as tools to model the hot roll profile geometry. For modeling procedure, the numerical values of the profiles obtained during the production of hot rolled products were used. The orthogonal Chebyshev and Foresight polynomials were considered as approximation methods.

Введение. В современных реалиях при получении каких-либо данных с производства возникает необходимость их статистической обработки. В первую очередь это обусловлено наличием большого количества выбросов и по-

грешностей в доступной выборке. Поэтому во многих случаях для «сглаживания неровностей», возникающих в данных, используется аппроксимация. Данное исследование основано на аппроксимации ортогональными полиномами Чебышева и Форсайта. В качестве главных критериев их использования можно привести: удобные рекуррентные формулы для вычислений, с последующей программной реализацией, а также свойство ортогональности, позволяющее описать различные модели и процессы в предприятиях.

Описание используемых методов. Ортогональными полиномами Чебышева называют последовательности ортогональных многочленов первого и второго рода. Данное исследование подразумевает использование ортогональных многочленов первого рода, которые определяются следующим рекуррентным соотношением:

$$T_0(x) = 1, T_1(x) = x, T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x). \quad (1)$$

Также ортогональные полиномы Чебышева могут иметь следующий вид [1, 2]:

$$\begin{aligned} \varphi_0(x) = 1, \quad \varphi_1(x) = x - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \dots, \\ \varphi_k(x) = x^k - \frac{\sum_{i=1}^n x^k \varphi_{k-1}(x_i)}{\varphi_{k-1}^2(x_i)} \varphi_{k-1}(x) - \frac{\sum_{i=1}^n x^k \varphi_{k-2}(x_i)}{\varphi_{k-2}^2(x_i)} \varphi_{k-2}(x) - \dots - \frac{\sum_{i=1}^n x_i^k}{n}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $k = 1, 2, \dots$.

Представленный вид полиномов основан на свойстве ортогональности, которое получается с помощью скалярного произведения векторов. Данное свойство имеет следующий вид:

$$[\varphi_j(x)\varphi_k(x)] = \sum_{i=1}^n \varphi_j(x_i)\varphi_k(x_i) = 0, \quad j \neq k. \quad (3)$$

Сама аппроксимирующая функция определяется по следующей формуле:

$$f(x) = \sum_{k=0}^m c_k \varphi_k(x), \quad (4)$$

где m – степень полученного многочлена после аппроксимации; c_k – коэффициенты Фурье.

Коэффициенты c_k определяются формулой

$$c_k = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_k(x_i) y_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_k^2(x_i)}, \quad k = 0, 1, \dots, m. \quad (5)$$

Переменные x_i являются входными значениями параметров исследуемого процесса, а y_i – выходными значениями.

В целом аппроксимирующие полиномы имеют большой спектр представителей. Так как ортогональные полиномы Форсайта также обладают свойством (3), то резонно провести сравнение именно между ними.

Ортогональные полиномы Форсайта [3] образуются с помощью рекуррентного соотношения

$$\varphi_{k+1}(x) = 2(x - \gamma_{k+1})\varphi_k(x) - \delta_k\varphi_{k-1}(x). \quad (6)$$

При $\varphi_0(x) = 1$, $\varphi_1(x) = 2(x - \gamma_1)$. Значение γ вычисляется с помощью следующих формул:

$$\gamma_{k+1} = \frac{\sum_{j=1}^N x_j \varphi_k^2(x_j)}{\sum_{j=1}^N \varphi_k^2(x_j)}, \quad \gamma_1 = \frac{\sum_{j=1}^N x_j}{N}, \quad \delta_k = \frac{\sum_{j=1}^N \varphi_k^2(x_j)}{\sum_{j=1}^N \varphi_{k-1}^2(x_j)}, \quad \delta_0 = 0, \quad (7)$$

где $k = 0, \dots, m - 1$ (m – степень аппроксимирующего полинома).

Преобразование полиномов Форсайта в аппроксимирующую функцию происходит так же, как и в случае ортогональных полиномов Чебышева по формулам (4) и (5).

Построение моделей и их сравнительный анализ. В качестве реальных данных используются результаты измерения томографом толщины горячекатаной полосы марки стали 0202 по ширине рентгеновским излучением с шагом 5 мм между датчиками на стане горячего проката [4]. На рисунке 1 представлена часть значений толщины профилей горячего проката марки стали 0202.

Марка стали на Стане 2000	Толщина по датчику 1	Толщина по датчику 2	Толщина по датчику 3	Толщина по датчику 4	Толщина по датчику 5	Толщина по датчику 6	Толщина по датчику 7	Толщина по датчику 8	Толщина по датчику 9	Толщина по датчику 10
0202	2115,7	2148,43	2172,95	2188,7	2198,92	2206,24	2211,67	2215,53	2218,29	2220,2
0202	2134,8	2157,42	2173,36	2184,98	2193,41	2199,61	2204,21	2207,09	2208,73	2209,8
0202	2100,21	2131,91	2154,22	2169,61	2179,91	2186,81	2191,58	2194,96	2197,25	2198,87
0202	2122,89	2149,73	2167,48	2179,02	2186,98	2192,9	2197,1	2200,16	2202,49	2204,66
0202	2046,39	2090,96	2125,86	2150,47	2168,81	2182,29	2192,64	2200,76	2206,6	2210,35
0202	2091,99	2122,77	2143,41	2157,66	2167,6	2174,39	2179	2182,36	2184,6	2186,02
0202	2101,58	2133,63	2155,26	2170,03	2180,08	2186,55	2190,6	2192,89	2194,09	2195,14
0202	2111,43	2139,09	2158,47	2171,66	2181,09	2187,51	2191,79	2194,65	2196,83	2198,28
0202	2102,67	2134,96	2157,32	2173,49	2184,63	2192	2197,12	2200,6	2202,94	2204,72
0202	2094,59	2126,74	2149,12	2165,22	2176,81	2185,33	2191,33	2195,26	2197,92	2199,72
0202	2108,95	2134,63	2153,08	2165,91	2175,25	2182,15	2187,34	2190,9	2193,39	2195,04
0202	2102,11	2133,37	2154,72	2170,14	2181,31	2189,19	2194,81	2198,29	2200,31	2201,4
0202	2091,79	2125,07	2147,01	2163,24	2175,43	2184,93	2191,84	2196,25	2198,72	2200,44

Рис. 1. Часть реальных значений толщины первых 14 профилей горячего проката марки стали 0202

Для построения модели и обработки большого количества значений толщины профилей был написан скрипт на языке программирования R. Аппрок-

симация проводилась ортогональными полиномами Чебышева и Форсайта десятой степени, так как относительно проведенных тестов именно эта степень дала лучший результат.

Марка стали на Стане 2000	Смоделированная толщина по датчику 1	Смоделированная толщина по датчику 2	Смоделированная толщина по датчику 3	Смоделированная толщина по датчику 4	Смоделированная толщина по датчику 5	Смоделированная толщина по датчику 6	Смоделированная толщина по датчику 7	Смоделированная толщина по датчику 8	Смоделированная толщина по датчику 9	Смоделированная толщина по датчику 10
0202	2142,028	2155,647	2167,599	2178,056	2187,176	2195,103	2201,968	2207,892	2212,983	2217,341
0202	2146,829	2159,519	2170,331	2179,491	2187,204	2193,655	2199,01	2203,42	2207,019	2209,927
0202	2125,815	2138,704	2149,977	2159,805	2168,346	2175,742	2182,124	2187,61	2192,306	2196,311
0202	2137,104	2150,696	2162,29	2172,131	2180,44	2187,417	2193,241	2198,072	2202,054	2205,315
0202	2079,604	2102,425	2122,314	2139,567	2154,456	2167,23	2178,119	2187,333	2195,065	2201,49
0202	2108,792	2124,233	2137,478	2148,772	2158,337	2166,378	2173,08	2178,612	2183,127	2186,763
0202	2121,042	2136,54	2149,653	2160,673	2169,866	2177,469	2183,698	2188,744	2192,78	2195,96
0202	2126,204	2141,182	2153,85	2164,498	2173,388	2180,753	2186,806	2191,734	2195,705	2198,869
0202	2121,035	2138,199	2152,725	2164,939	2175,133	2183,571	2190,492	2196,108	2200,61	2204,168
0202	2111,872	2129,753	2144,912	2157,679	2168,353	2177,205	2184,478	2190,39	2195,138	2198,896
0202	2120,954	2136,351	2149,356	2160,274	2169,376	2176,908	2183,09	2188,118	2192,167	2195,392
0202	2119,232	2136,339	2150,754	2162,814	2172,822	2181,051	2187,747	2193,13	2197,395	2200,717
0202	2108,844	2127,026	2142,558	2155,739	2166,841	2176,112	2183,779	2190,047	2195,103	2199,114
0202	2113,47	2131,957	2147,789	2161,273	2172,686	2182,28	2190,285	2196,904	2202,324	2206,71

Рис. 2. Часть значений толщины профилей, смоделированных с помощью аппроксимации ортогональными полиномами Чебышева

Марка стали на Стане 2000	Смоделированная толщина по датчику 1	Смоделированная толщина по датчику 2	Смоделированная толщина по датчику 3	Смоделированная толщина по датчику 4	Смоделированная толщина по датчику 5	Смоделированная толщина по датчику 6	Смоделированная толщина по датчику 7	Смоделированная толщина по датчику 8	Смоделированная толщина по датчику 9	Смоделированная толщина по датчику 10
0202	2132,871	2150,785	2166,033	2178,936	2189,788	2198,852	2206,366	2212,544	2217,575	2221,631
0202	2145,38	2158,71	2170,023	2179,563	2187,553	2194,195	2199,669	2204,139	2207,749	2210,629
0202	2115,906	2133,365	2148,162	2160,622	2171,044	2179,692	2186,807	2192,605	2197,278	2200,997
0202	2135,584	2149,828	2161,936	2172,172	2180,774	2187,957	2193,913	2198,817	2202,821	2206,063
0202	2065,945	2095,321	2120,206	2141,135	2158,595	2173,026	2184,823	2194,344	2201,91	2207,808
0202	2106,649	2123,588	2137,87	2149,826	2159,753	2167,922	2174,573	2179,924	2184,168	2187,477
0202	2118,911	2135,368	2149,227	2160,809	2170,409	2178,288	2184,683	2189,808	2193,851	2196,982
0202	2124,353	2140,126	2153,421	2164,551	2173,797	2181,413	2187,627	2192,642	2196,639	2199,779
0202	2118,788	2136,949	2152,254	2165,057	2175,681	2184,415	2191,518	2197,224	2201,741	2205,255
0202	2109,6	2128,495	2144,443	2157,807	2168,915	2178,064	2185,519	2191,52	2196,281	2199,992
0202	2119,08	2135,267	2148,9	2160,302	2169,766	2177,556	2183,907	2189,031	2193,114	2196,322
0202	2116,925	2135,047	2150,257	2162,921	2173,371	2181,906	2188,793	2194,272	2198,557	2201,838
0202	2105,935	2126,113	2143,032	2157,105	2168,701	2178,156	2185,77	2191,811	2196,518	2200,105
0202	2105,59	2127,717	2146,354	2161,932	2174,841	2185,43	2194,015	2200,881	2206,278	2210,435

Рис. 3. Часть значений толщины профилей, смоделированных с помощью аппроксимации ортогональными полиномами Форсайта

Для одного из профилей марки стали 0202 был построен график, позволяющий наглядно сравнить полученные разными методами модели и реальные данные.

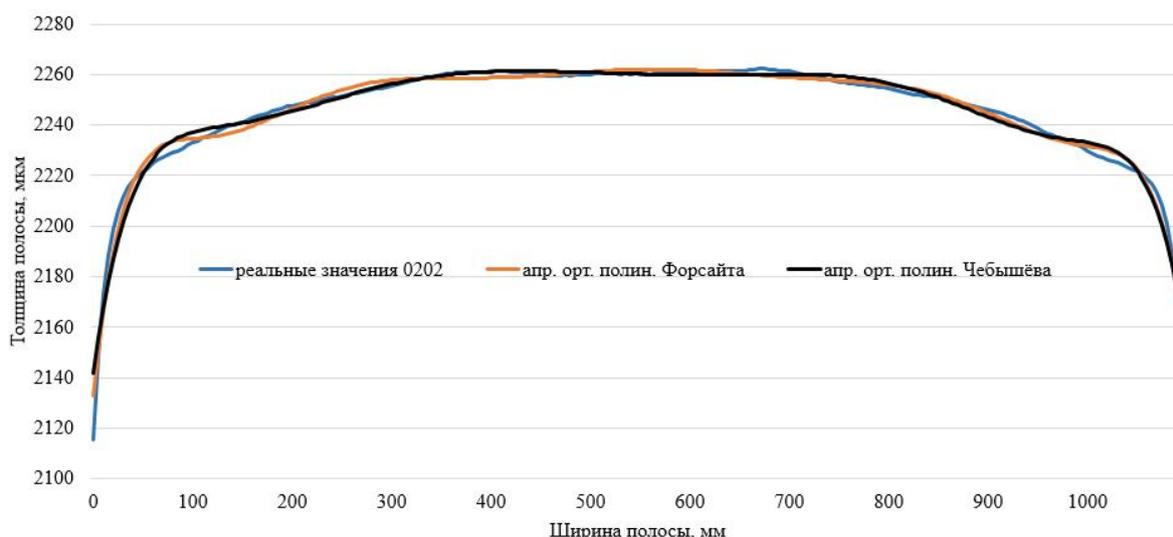


Рис. 4. Сравнение моделей и реальных данных

Средние значения остаточной дисперсии S и коэффициента детерминации R^2 по всем моделям, основанным на ортогональных полиномах Чебышева, получились следующими: $S = 9,1$, $R^2 = 97,7\%$. А средние значения S и R^2 по всем моделям, основанным на ортогональных полиномах Фурсайта, оказались равными: $S = 6,93$, $R^2 = 98,2\%$. Также был взят доверительный интервал 2,5% по толщине и ширине полосы для каждого профиля марки стали 0202, который полностью покрыл все полученные различными методами смоделированные значения (рис. 4).

Список использованных источников

1. Инютин, Д. М. Аппроксимация геометрии поверхности профиля горячекатаного рулона ортогональными полиномами Чебышева // XVI Всероссийская научно-практическая конференция студентов и аспирантов. 24–25 апреля 2019 г. – С. 302 – 304.
2. Приложение ортогональных полиномов Чебышева к оценке психофизиологической напряженности оператора / Е. А. Будылина, И. А. Гарькина, А. М. Данилов, В. О. Петренко // Молодой ученый. – 2013. – № 6. – С. 37 – 40.
3. Муращенко, Д. Д. Аппроксимация экспериментальных зависимостей с использованием ортогональных полиномов Чебышева и Фурсайта в системе Mathcad / Д. Д. Муращенко // Материалы Международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – 2010. – № 8. – С. 90 – 100.
4. Пименов, В. А. Повышение точности аппроксимации формы поперечного профиля горячего проката / В. А. Пименов, Е. В. Кузнецова, А. Н. Шкарин // Вестник ИрГТУ. – 2016. – Т. 20, № 9. – С. 130 – 138.

Н. Г. Беляев, И. А. Елизаров, В. Н. Назаров
(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ, ПОСТРОЕННОЙ НА БАЗЕ СЕТИ MLP

Аннотация. Рассматривается функционирование нейросетевой системы регулирования нестационарным динамическим объектом при наличии в системе регулирования существенных нелинейностей.

N. G. Belyaev, I. A. Elizarov, V. N. Nazarov
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

RESEARCH OF NEURAL NETWORK CONTROL SYSTEM BASED ON MLP NETWORK

Abstract. The functioning of the neural network control system by a non-stationary dynamic object in the presence of significant nonlinearities in the control system is considered.

Существует целый ряд динамических объектов, управление которыми с помощью регуляторов классической теории регулирования, такими как П, ПИ, ПИД, осуществить либо вообще не представляется возможным, либо сопряжено с большими сложностями и погрешностями в работе. Приведем ряд примеров.

Объект, содержащий большое запаздывание – для АСР, содержащей такой объект, весьма сложно рассчитать настройки регулятора, и переходные процессы зачастую не удовлетворительны.

Объект, характеризующийся существенной нелинейностью и стохастичностью поведения, широкой областью изменения параметров объекта в условиях его функционирования. В качестве примера приведем химический реактор, в котором необходимо поддерживать определенную температуру. В процессе работы в реакторе изменяется объем смеси жидких реагентов. Следовательно, изменяется количество тепла, которое необходимо передать смеси, чтобы изменить ее температуру на один градус. Это приводит к тому, что изменяется передаточная функция реактора как объекта управления. Для управления такими объектами применяют так называемые «робастные» системы. «Робастные» регуляторы настраивают по усредненным характеристикам объекта управления, поэтому регулирование контролируемой величины происходит некачественно. При достаточно большом диапазоне изменения характеристик объекта «робастные» регуляторы вообще нельзя настроить. Кроме «робастных», приме-

няют различные адаптивные или самонастраивающиеся регуляторы, переходные процессы регулируемой величины которых зачастую бывают неплохие, но такие регуляторы применимы не везде.

Одним из подходов для регулирования выходных параметров у подобных объектов является использование самонастраивающейся системы, построенной на базе нейронной сети (NN) MLP (Multi-Layer Perceptron) [1, 2] (рис. 1), где ОУ – объект управления; Д – датчик; ЗН – нелинейный элемент «зона нечувствительности»; NN – нейронная сеть (Neural Network); БКВК – блок коррекции весовых коэффициентов нейронной сети.

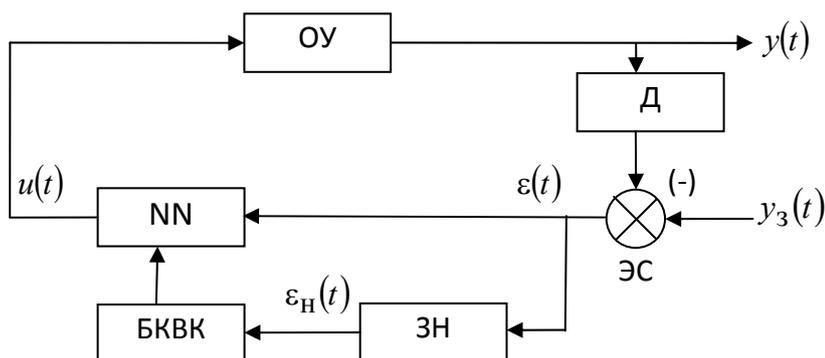


Рис. 1. Структурная схема самонастраивающейся нейросетевой системы управления

Сеть NN (рис. 2) характеризуется числом нейронов N_1 во внутреннем слое (слой 1). Входной слой (слой 0) состоит из одного узла – приемника сигнала $\varepsilon(t)$ ошибки регулирования, а выходной слой – из одного нейрона – источника сигнала $u(t)$, при этом $N_0 = N_2 = 1$.

Каждый i -й нейрон l -го слоя ($l = \overline{1, 2}$) преобразует входной вектор $\mathbf{o}^{l-1} = (o_1^{l-1}, \dots, o_{N_{l-1}}^{l-1})$ в выходную скалярную величину o_i^l .

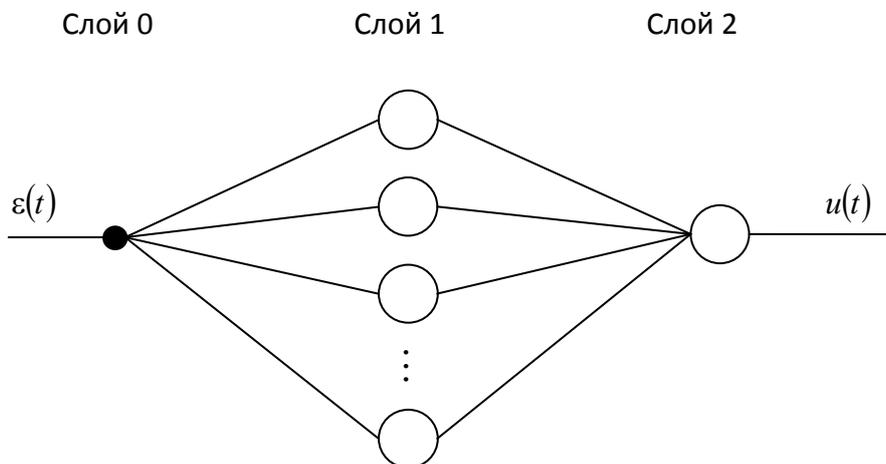


Рис. 2. Архитектура нейронной сети MLP с одним внутренним слоем

Математическое описание сети NN записывается в виде системы уравнений [1]:

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= o_1^2, \quad o_i^l = f(z_i^l), \quad i = \overline{1, N_l}, \quad l = \overline{1, 2}, \\ z_i^l &= \sum_{j=0}^{N_{l-1}} w_{ij}^l \cdot o_j^{l-1}, \quad i = \overline{1, N_l}, \quad l = \overline{1, 2}, \\ o_1^0 &= \varepsilon(t), \quad o_0^0 = o_0^1 = 1, \\ f(z) &= \frac{1}{1 - \exp(-z)}, \end{aligned} \right\}$$

где z_i^l – суперпозиция входных сигналов i -го нейрона в l -м слое; w_{ij}^l – настраиваемый весовой коэффициент, характеризующий связь j -го нейрона $(l-1)$ -го слоя с i -м нейроном l -го слоя; o_i^l – выходной сигнал i -го нейрона в l -м слое; f – сигмоидальная функция активации.

При функционировании самонастраивающейся нейросетевой системы управления настройки системы – весовые коэффициенты NN изменяются таким образом, что рассогласование $\varepsilon(t) \rightarrow 0$. Корректировка весовых коэффициентов w_{ij}^l осуществляется по методу обратного распространения ошибки (error back propagation) на основе измеренного датчиком выходного параметра $y(t)$ объекта управления и текущего задания $y_3(t)$ [1].

При использовании в качестве функции активации нейронов сигмоидальной функции алгоритм обучения нейронной сети описывается системой [1]:

$$\left. \begin{aligned} w_{ij}^l(t) &= w_{ij}^l(t-1) - \gamma \cdot \frac{\partial \varepsilon_H}{\partial w_{ij}^l} \cdot \delta, \quad i = \overline{1, N_l}, \quad j = \overline{0, N_{l-1}}, \quad l = \overline{1, 2}, \\ \frac{\partial \varepsilon_H}{\partial w_{1j}^2} &= \varepsilon_H \cdot f(z_1^2) \cdot (1 - f(z_1^2)) \cdot o_j^1, \quad j = \overline{0, N_1}, \\ \frac{\partial \varepsilon_H}{\partial w_{ij}^1} &= \varepsilon_H \cdot f(z_1^2) \cdot (1 - f(z_1^2)) \cdot w_{1i}^2 \cdot f(z_i^1) \cdot (1 - f(z_i^1)) \cdot o_j^0, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{0, 1}. \end{aligned} \right\}$$

В качестве примера объекта управления для проведения имитационных исследований взят аппарат с мешалкой и рубашкой, в котором требуется поддерживать температуру. В системе управления действуют различного вида нелинейности (например, исполнительные механизмы и регулирующие органы могут иметь нелинейности вида гистерезис, люфты и др.).

На рисунках 3 – 5 приведены графики переходных процессов в системе.

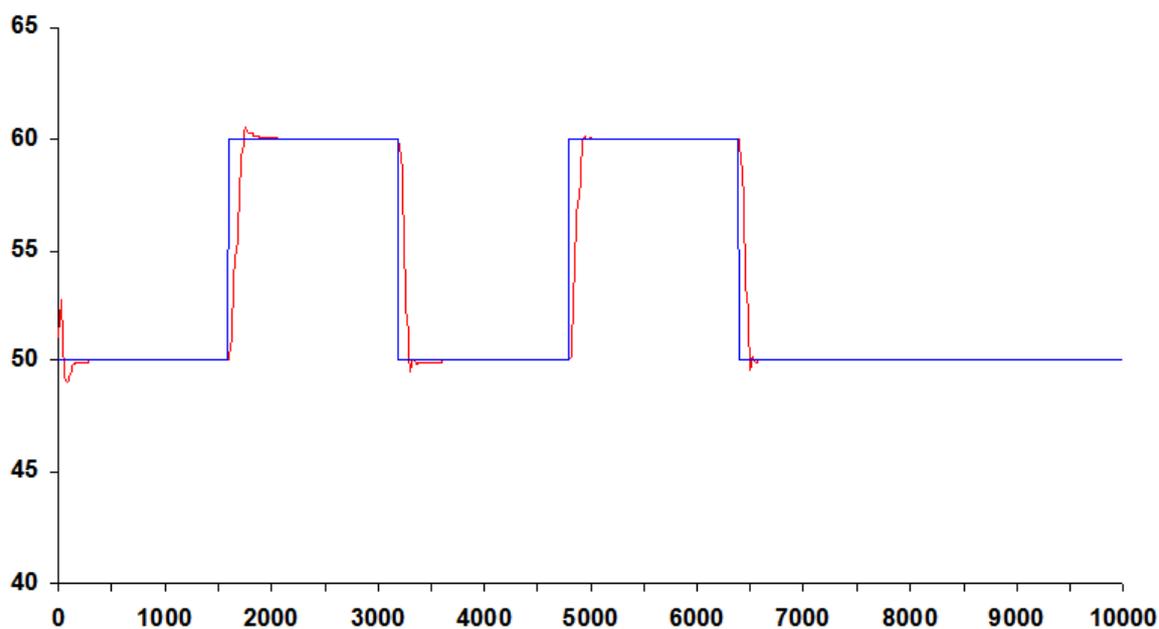


Рис. 3. Процесс обработки задания в системе с нейрорегулятором при отсутствии нелинейностей

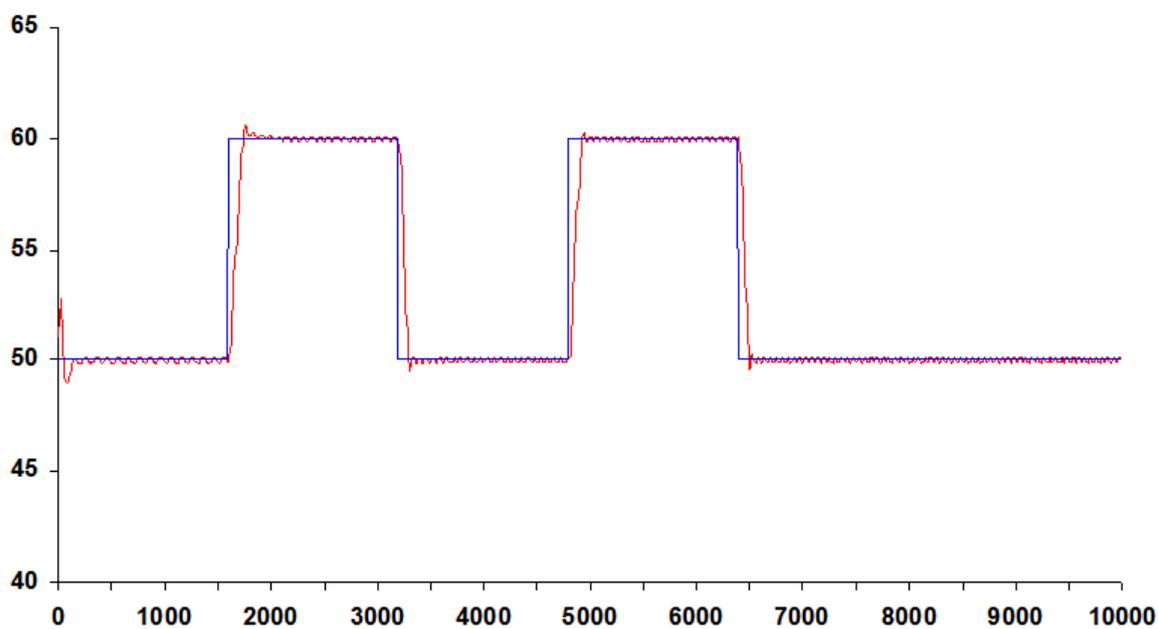


Рис. 4. Процесс обработки задания в системе с нейрорегулятором при наличии гистерезиса

Как видно из рис. 3 – 5, нейросетевая система регулирования обеспечивает приемлемое качество регулирования даже при наличии в системе существенных нелинейностей в виде гистерезиса и люфта.

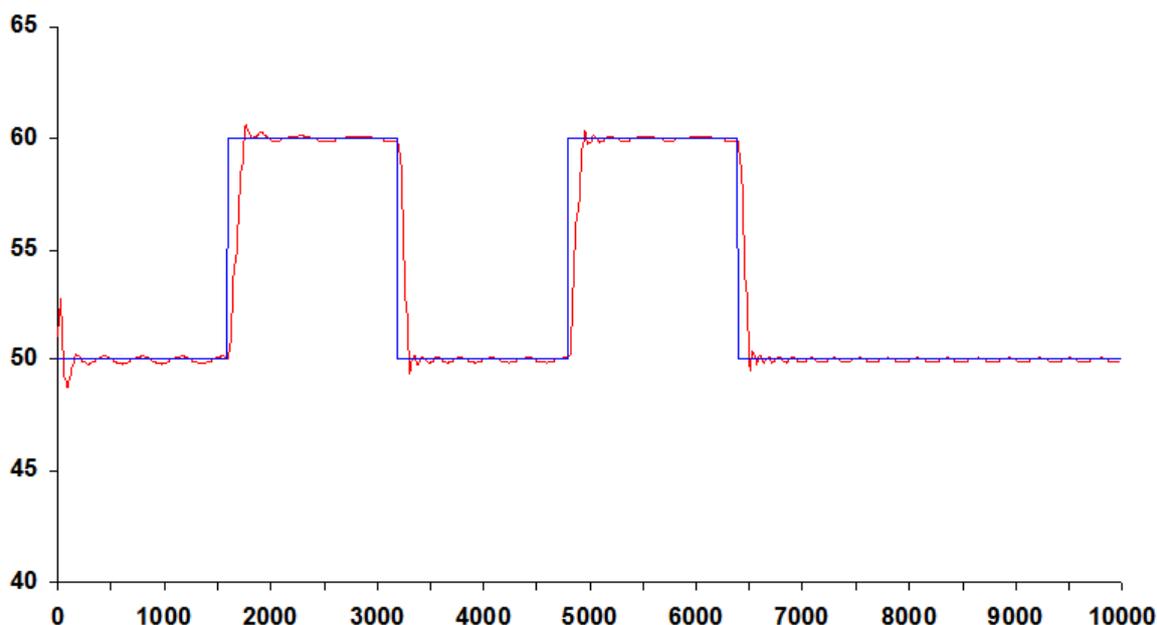


Рис. 5. Процесс обработки задания в системе с нейрорегулятором при наличии люфта величиной 5%

Список использованных источников

1. Фролов, С. В. Самонастраивающаяся нейросетевая система управления / С. В. Фролов, И. А. Елизаров, М. Н. Солуданов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 4. – С. 848 – 854.
2. Елизаров, И. А. Самонастраивающаяся нейросетевая система управления многосвязными динамическими объектами / И. А. Елизаров, М. Н. Солуданов // Информационные процессы и управление. – 2006. – № 1. – С. 30 – 44.

**В. А. Кербель, М. А. Ложкин,
И. А. Елизаров, В. Н. Назаров, А. А. Третьяков**
(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БРАГОРЕКТИФИКАЦИОННОЙ УСТАНОВКОЙ

Аннотация. В работе рассматривается автоматизированная система управления технологическим процессом брагоректификации при производстве спирта, построенная на базе промышленного контроллера серии I-8000 и SCADA-системы «КРУГ-2000». Представлена структура АСУ ТП, построенной с использованием современных программных и технических средств автоматизации.

**V. A. Kerbel, M. A. Lozhkin,
I. A. Elizarov, V. N. Nazarov, A. A. Tretyakov**
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

SYSTEM OF MANAGEMENT OF BRAGORECTIFICATION INSTALLATION

Abstract. The work considers an automated control system for the process of rectification during the production of alcohol, built on the basis of the industrial controller of the I-8000 series and SCADA-system "KRUG-2000". The structure of process control systems built using modern software and hardware automation is presented.

Производство этилового спирта является одной из ведущих отраслей пищевой промышленности. Этиловый спирт находит широкое применение.

Качество получаемого спирта зависит не только от качества используемого сырья, но и во многом определяется технологическими особенностями производства, состоянием технологического оборудования и автоматизируемой системы управления технологическим процессом (АСУ ТП), точностью воспроизведения технологического регламента. На спиртзаводе ОАО «Биохим» (Тамбовская область) использование морально и физически устаревших контрольно-измерительных и регулирующих приборов, неэффективных алгоритмов регулирования, большая доля ручного труда при управлении технологическим процессом, существенное влияние человеческого фактора приводили к получению продукции невысокого качества, сверхнормативным потерям спирта, перерасходу пара, существенному снижению производительности брагоректификационной установки (БРУ) относительно проектной.

Основной целью при разработке новой АСУ ТП было улучшение качества спирта и увеличение производительности БРУ. Помимо этого АСУ ТП должна уменьшить влияние человеческого фактора, улучшить условия труда посредством прямого ограничения контакта человека с производством, снизить (или полностью исключить) количество аварийных ситуаций, повысить интеллектуальный уровень рабочих и служащих, научив их работать на сложной, современной наукоемкой технике.

Одной из самых основных и самой энергоемкой стадией при производстве этилового спирта является стадия выработки спирта из бражки на брагоректификационной установке (БРУ), включающей набор нескольких ректификационных колонн различного назначения.

При этом согласно технологическому регламенту должны обеспечиваться:

- стабилизация давлений вверху и внизу каждой из колонн, а также поддержание регламентных значений температур воды на выходах из дефлегматоров колонн;

- стабилизация температуры на тарелке питания ректификационной колонны;
- стабилизация расхода бражки, поступающей на питание бражной колонны;
- стабилизация уровня спирта в колонне окончательной очистки;
- стабилизация давления пара в магистральном паропроводе.

Помимо этого, должен осуществляться контроль температур вверху и внизу каждой из колонн, температуры бражки на входе в БК, температуры спирта на выходе холодильника, температур на тарелках сивушной зоны РК (4, 6, 8 и 10 тарелки), а также производится контроль состояния подающих насосов.

Анализ процесса как объекта управления показывает, что колонны БРУ являются многосвязными объектами и обладают значительной инерционностью и запаздыванием по каналам. Для обеспечения высокого качества регулирования требуется использование сложных систем регулирования (многосвязных, каскадных, следящих).

Возможность реализации таких систем регулирования является одним из критериев для выбора технического и программного обеспечения системы управления.

Проведя достаточно широкий анализ различных контроллерных средств, было отдано предпочтение продукции достаточно известной компании ICPDAS, Тайвань: контроллеру I-8837, программируемому в среде ISaGRAF, и модулям ввода-вывода серии I-8000.

АСУ ТП отделения БРУ представляется как иерархическая многоуровневая система. В ней условно можно выделить следующие уровни:

- уровень датчиков и исполнительных механизмов (нижний уровень);
- уровень программируемых логических контроллеров (средний уровень);
- операторский или верхний уровень.

При этом структура комплекса технических средств (КТС) представлена на рис. 1.

Технические средства нижнего уровня представляются:

- датчиками давления Дон-17-ДИ, температуры ТСМУ, уровня Дон-17-ДД, ультразвуковыми расходомерами UFM-005, имеющими унифицированный токовый выход 4...20 мА. В силу того, что помещение цеха БРУ является взрывоопасной зоной (класс помещения В-1а по классификации по ПУЭ), используются датчики, имеющие взрывобезопасное исполнение с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» (Exia или Exib);
- электрическими исполнительными механизмами с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка» (Exd).

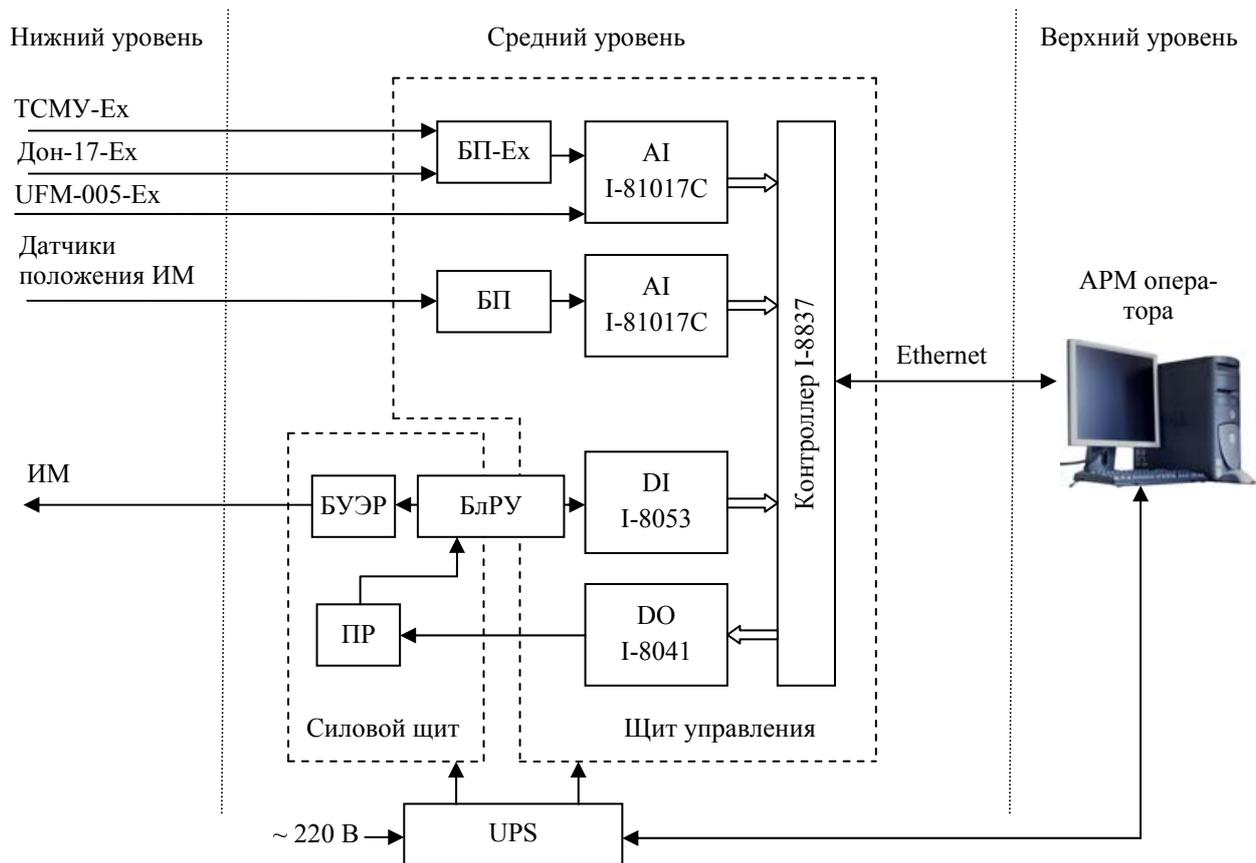


Рис. 1. Структура КТС АСУ ТП отделения БРУ:

БП, БП-Ех – блоки питания общепромышленные и искробезопасные;
 АИ – модули аналогового ввода; ДИ – модуль дискретного ввода; ДО – модуль дискретного вывода; ПР – промежуточные реле; БлРУ – блоки резервного управления;
 БУЭР – блоки управления электрическим исполнительным механизмом (ИМ)

Как было отмечено, контроллерный уровень представлен контроллерами и модулями ввода-вывода серии I-8000. Эти контроллеры полностью сертифицированы, внесены в реестр средств измерений РФ и имеют разрешение Ростехнадзора. Уровень контроллеров в системе выполняет следующие функции:

- сбор сигналов от датчиков, установленных на объекте управления;
- предварительная обработка сигналов: фильтрация и масштабирование;
- реализация алгоритмов управления и формирование управляющих сигналов на исполнительные механизмы;
- передача и прием информации из промышленной сети.

Все технические средства контроллерного уровня расположены в двух навесных шкафах, имеющих степень защиты от попадания пыли и влаги IP44 (рис. 2).

В щите управления, помимо собственно контроллера и модулей ввода-вывода аналоговых токовых сигналов I-87017RC, дискретных входных сигналов I-8053, дискретных выходных сигналов I-8041, расположен блок питания контроллера DIN-540А, общепромышленные (БПДМ-24) и искрозащищенные (БПДМ-24Ех) блоки питания датчиков.



Рис. 2. Силовой щит и щит управления

В силовом щите установлены промежуточные реле и бесконтактные реверсивные пускатели (БУЭР-1) для управления электрическими импульсными исполнительными механизмами.

По требованию Заказчика в систему автоматизации введены блоки резервного ручного управления (БРУ) электроприводами клапанов. Эти блоки включают в себя переключатель режимов управления РУЧ/АВТ, кнопки ручного управления Больше/Меньше, коммутационное реле, а также двухканальный измеритель ТРМ-200, на котором отображаются величина регулируемого параметра и положение исполнительного механизма.

Электропитание оборудования щитов, а также верхнего уровня управления осуществляется через источники бесперебойного питания Smart-UPS, которые помимо фильтрации сетевых помех обеспечивают работу системы управления в течение 30 минут после отключения электропитания.

Верхний уровень представлен станцией оператора (автоматизированного рабочего места – АРМ), выполненной на базе PC-совместимого компьютера. АРМ выполнен с использованием SCADA «КРУГ-2000».

Автоматизированное рабочее место оператора включает несколько видеокадров: общую мнемосхему БРУ (рис. 3), отдельные мнемосхемы колонн – бражной, эпюрационной, ректификационной, окончательной очистки.

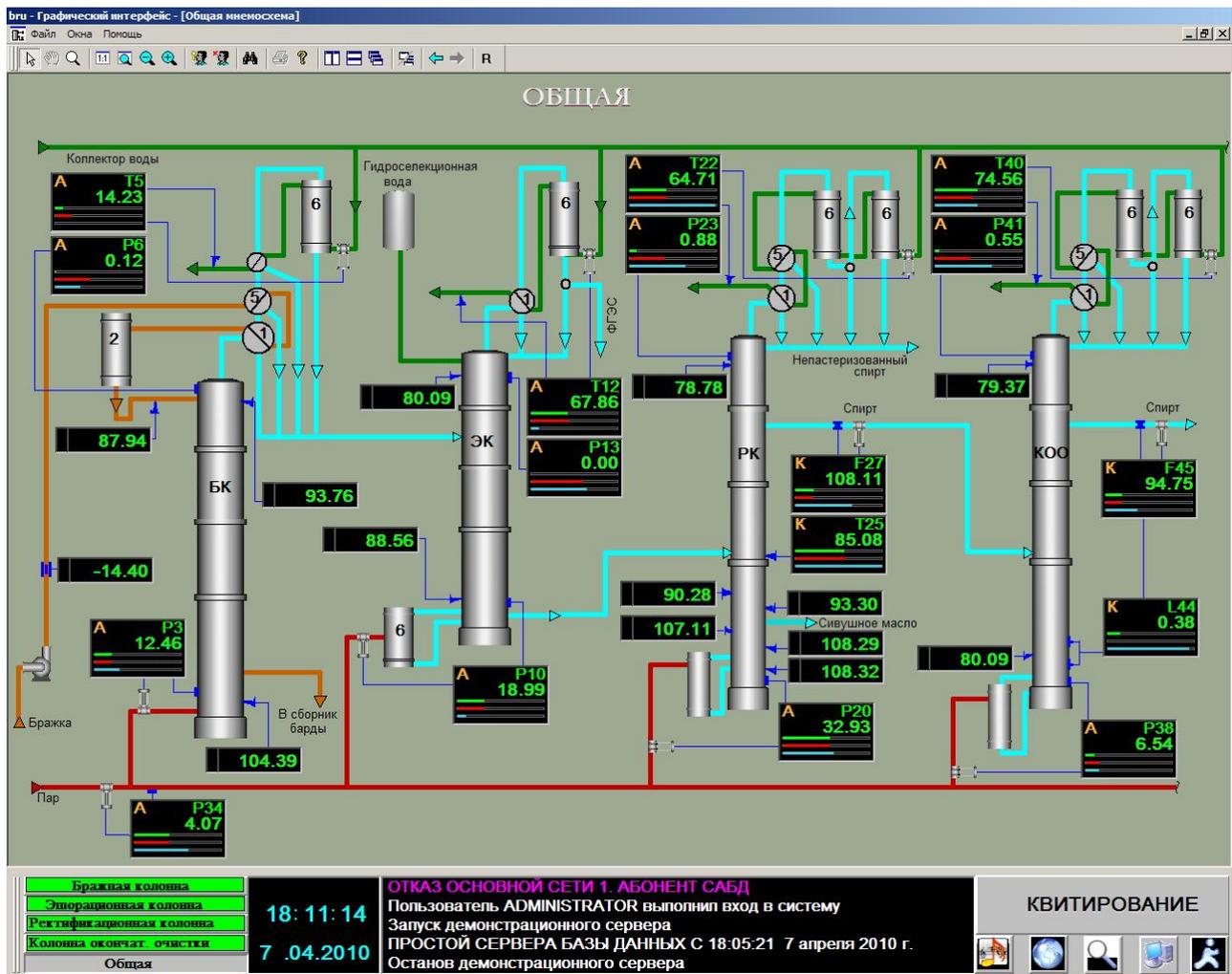


Рис. 3. Видеокادر «Общая мнемосхема»

Для программирования контроллеров выбрана всемирно известная инструментальная система ISaGRAF. Выбор ISaGRAF далеко не случаен. При выборе инструментального пакета в первую очередь учитывалось качество программного обеспечения и функциональные возможности.

Взаимодействие между прикладным программным обеспечением управляющего контроллера и верхним уровнем управления – АРМ оператора – осуществляется посредством технологии OPC. Вместе с инструментальной средой программирования ISaGRAF компанией ICSTriplex (производителем ISaGRAF) поставляется OPC-сервер ISaGRAF OPC DA Server, поддерживающий спецификацию OPC DA 2.0.

После внедрения АСУ ТП брагоректификации при производстве спирта и отладки основных контуров регулирования был получен ощутимый положительный эффект, особенно в части увеличения объема производства спирта, улучшения и стабилизации его качества. Помимо этого существенно улучшились условия труда операторов-технологов и существенно повысилась дисциплина труда.

Д. Ю. Головин¹, А. Г. Дивин²,
А. А. Самодуров¹, А. И. Тюрин¹, Ю. И. Головин^{1,3}

¹ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина»,
Тамбов, Россия;

² ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия;

³ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова»,
Москва, Россия)

ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ И ДЕФЕКТОСКОПИИ КЕРАМИЧЕСКИХ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В статье описан модифицированный метод лазерной вспышки, позволяющий определять коэффициент температуропроводности материалов без вырезки из них образцов определенной геометрии. «Точечный» ступенчатый нагрев и высокоразрешающее кинофильмирование тепловизором эволюции температурного поля дают возможность проводить тестирование при одностороннем доступе как тонких пластинчатых объектов, так и объемных.

D. Yu. Golovin¹, A. G. Divin²,
A. A. Samodurov¹, A. I. Tyurin¹, Yu. I. Golovin^{1,3}
(¹ Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia;
² Tambov State Technical University, Tambov, Russia;
³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia)

THERMOGRAPHIC TECHNIQUE OF THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT AND NON-DESTRUCTIVE TESTING OF COMPOSITES AND CERAMICS

Abstract. The paper describes modification of laser flash method that allows determining temperature diffusivity of materials and constructions without cutting samples of predefined geometry. “Point” stepwise heating of the studied object surface accompanied by high temporary-spatial resolution infrared filming the evolution of transient temperature distribution opens possibilities for the temperature diffusivity measurement either on the thin plate samples or massive samples.

В технической диагностике и неразрушающем контроле нашли применение две группы активных методов инфракрасной (ИК) термографии – стационарные и нестационарные. Последние используют различные временные зависимости интенсивности подводимого теплового потока – обычно это дельта-функция (импульс Дирака), ступенчатое или периодическое возбуждение. Для измерения теплофизических характеристик (ТФХ) широкое распространение получил метод лазерной вспышки, предложенный У. Паркером с соавтора-

ми еще в 1961 году. Он заключается в однородном импульсном нагреве лицевой поверхности пластинчатого образца и регистрации кинетики изменения температуры на его тыльной стороне. Метод лазерной вспышки позволяет за короткое время измерить коэффициент температуропроводности a и теплоемкость C_p материала, а затем вычислить и теплопроводность $\lambda = a/C_p\rho$, где ρ – плотность материала. Достоинством метода при определении a является отсутствие необходимости измерения абсолютных температур и плотности потока поглощенной энергии (что представляет определенные трудности, особенно при использовании тепловизора в качестве регистратора тепловых характеристик). Это преимущество вытекает как из природы и размерности коэффициента температуропроводности $a [L^2/t]$, так и используемой в методе лазерной вспышки схемы обработки экспериментальных данных и извлечения информации о величине a . В этом способе необходимо измерить лишь толщину образца d и характерное время t^* достижения полувысоты максимума температуры на тыльной стороне образца, что согласуется со структурой размерности a . Однако этому подходу присущи и серьезные недостатки, в частности, необходимость предварительной подготовки образца (вырезка из массива, придание ему определенной геометрии – пластины заданной толщины с плоскопараллельными поверхностями) и обеспечения двустороннего доступа к нему, трудности работы с тонкими пленочными образцами и др. Это делает его непригодным для использования в производственных условиях без разрушения или существенного повреждения объекта контроля. Целью работы была разработка неразрушающих динамических экспресс-методов и средств определения теплофизических характеристик, не требующих вырезки образцов из массива и пригодных к использованию как в лабораторных, так и в производственных/полевых условиях при одностороннем доступе к объекту.

Предлагаемый подход [1] основан на ступенчатом точечном нагреве участка поверхности образца лучом лазера в пятне с гауссовым радиусом $r_0 = 0,1 \dots 0,3$ мм и одновременной (синхронной) регистрации формирующегося в результате такого нагрева динамического температурного поля на поверхности образца с помощью тепловизора. Последующая компьютерная обработка радиально симметричной картины изотерм по разработанным моделям и алгоритмам позволяет определять величину a .

Верификация описанного подхода определения a проведена на ряде материалов (циркониевая керамика, полимерный композит, пластики, вулканизированная резина, гипс, малоуглеродистая сталь и др.), значительно отличающихся как теплофизическими, так и оптическими свойствами.

В описанных ниже экспериментах точечный нагрев осуществляли ступенчатым импульсом сфокусированного лазерного пучка с одновременной регистрацией эволюции латеральной тепловой волны на поверхности образца

с помощью тепловизора FLIR A35sc. Однако лазер создавал не короткую вспышку, как в классическом лазер-флеш-методе и в его латеральных модификациях, а работал непрерывно в течение всего процесса измерения, т.е. в режиме ступенчатого импульса нагрева. Это позволяло значительно уменьшить локальный перегрев в центре пятна нагрева, одновременно увеличив температуру во всей инспектируемой области, а также снизить требования к мощности лазера. Получаемые кадры фильма преобразовывали в двумерные карты распределения температуры. Для уменьшения влияния неоднородности оптических свойств поверхности образца из каждой такой карты попиксельно вычитали карту начального состояния до начала нагрева. Затем определяли положение центра симметрии изотерм и производили усреднение величины T по углу φ при фиксированных расстояниях r от центра пятна нагрева, что сильно снижало шумы и помехи при измерениях. Усреднение T по φ производили по кольцевой области, ограниченной радиусами $r - \Delta r$ и $r + \Delta r$, где Δr составляло 5...10% от r . Как правило, для определения a принимали $\varphi = 360^\circ$.

Из соображений симметрии ясно, что точечный нагрев поверхности массивного однородного изотропного тела должен вызывать радиально-симметричное распространение сферического теплового фронта в полупространство исследуемого материала. Для некоторых граничных условий известны точные решения уравнения Фурье. Однако любые точные решения зависят от плохо известного в реальном эксперименте распределения подводимой энергии в пятне нагрева. В частности, это распределение зависит не только от пространственного распределения плотности потока энергии в пучке, но и от оптических свойств приповерхностных слоев материала (коэффициентов поглощения, отражения, испускания, рассеяния). Однако точное решение можно с достаточной для практики точностью заменить приближенным, если выполнить некоторые условия: длительность τ процедуры измерения, включающей нагрев и одновременную регистрацию картины изотерм, должна быть примерно на порядок величины больше характерного времени $\tau_F = (r_0)^2/a$ для данного типа материала и гауссового радиуса пятна нагрева r_0 . За такое время тепловой фронт успевает распространиться на расстояние $r > (3...5)r_0$ и «память» о конкретном распределении поглощенной энергии в пятне нагрева будет утрачена. При $r_0 \sim 0,1$ мм оптимальная величина τ составляет для металлов десятые доли секунды, для керамик – единицы секунд, а для полимеров и высокопористых сред может достигать до десятков секунд, а при $r_0 \sim 0,3$ мм, соответственно, на порядок величины больше. Таким образом, при соблюдении условия $\tau \gg \tau_F$ конкретный вид радиального распределения энергии в падающем пучке становится несущественным уже на расстоянии от центра $r > (2...3)r_0$, а распределение температуры в однородном полупространстве можно считать сферически симметричным вплоть до времен, лимитируемых выходом теплового фронта на границы образца или изделия. Тогда для $r \gg r_0$ и времен наблюдения $t \gg t^* = r_0^2/a$ зави-

симость температуры локального нагрева $T(r, t)$ может быть аппроксимирована с точностью порядка 1% выражением

$$T(r, t) = Br^{-1} \operatorname{erfc}[0,5(r - r_0)(at)^{-1/2}], \quad (1)$$

где B – некоторая константа, зависящая от подводимой энергии, r_0 и λ .

Из структуры формулы (1) следует, что температурное распределение выходит на асимптотику $1/r$ за время t , задаваемое величиной a . Для определения величины a из экспериментальных данных целесообразно перестроить распределение $T(r, t)$ в координатах $T \cdot r$ (по оси ординат $O-y$) и $(r - r_0)t^{-1/2}$ (по оси абсцисс $O-x$), а затем аппроксимировать его функцией вида $y = D \operatorname{erfc}(Ax)$, варьируя лишь масштабы по осям. Как следует из формулы (1), найденное таким образом оптимальное значение параметра $A = 0,5a^{-1/2}$ и определяет величину $a = (4A^2)^{-1}$. Как легко видеть, при таком алгоритме определения a ее величина не зависит ни от мощности тепловыделения и от ее распределения в пятне нагрева, ни от абсолютных температур в области измерений. Таким образом, предлагаемый метод является не зависящим от оптических характеристик приповерхностных слоев материала (коэффициентов поглощения, испускания, рассеяния и др.). Попиксельное вычитание сигнала до нагрева из сигналов после начала нагрева значительно снижает влияние оптической неоднородности материала (если таковая имеется).

В условиях реального эксперимента точность определения $T(r, t)$ при больших r уменьшается из-за конечной разрешающей способности тепловизора по температуре и роста роли шумов различной природы, что и определяет разумный диапазон длительности измерения $3\tau_F \lesssim \tau \lesssim 10\tau_F$.

Результаты расчетов величины a в каждом отдельном тесте, а также усредненное по 8 тестам значение a_8 для каждого протестированного материала даны в таблице.

Материал	№ Теста								
	----- Измеренные значения a	1	2	3	4	5	6	7	8
Керамика	$a, \text{мм}^2/\text{с}$	1,041	1,010	1,033	1,091	1,076	1,046	1,001	1,040
	$\delta a, \text{мм}^2/\text{с}$	0,011	0,018	0,017	0,026	0,012	0,015	0,019	0,010
	$a_8, \text{мм}^2/\text{с}$	1,035 ± 0,034							
	$a^*, \text{мм}^2/\text{с}$	1,15 ± 0,08							
Композит	$a, \text{мм}^2/\text{с}$	0,238	0,244	0,237	0,240	0,227	0,233	0,237	0,238
	$\delta a, \text{мм}^2/\text{с}$	0,014	0,019	0,011	0,044	0,010	0,009	0,017	0,005
	$a_8, \text{мм}^2/\text{с}$	0,233 ± 0,008							
	$a^*, \text{мм}^2/\text{с}$	0,255 ± 0,021							

Материал	№ Теста ----- Измеренные значения a	1	2	3	4	5	6	7	8
	Полимер	$a, \text{мм}^2/\text{с}$	0,239	0,268	0,240	0,239	0,246	0,265	0,243
$\delta a, \text{мм}^2/\text{с}$		0,039	0,008	0,017	0,019	0,015	0,017	0,015	0,015
$a_8, \text{мм}^2/\text{с}$		0,249 ± 0,018							
$a^*, \text{мм}^2/\text{с}$		0,248 ± 0,025							
F4(black)	$a, \text{мм}^2/\text{с}$	0,323	0,319	0,355	0,333	0,336	0,343	0,327	0,326
	$\delta a, \text{мм}^2/\text{с}$	0,006	0,008	0,009	0,035	0,013	0,017	0,016	0,015
	$a_8, \text{мм}^2/\text{с}$	0,333 ± 0,015							
	$a^*, \text{мм}^2/\text{с}$	0,389±0,55							
Гипс	$a, \text{мм}^2/\text{с}$	0,432	0,430	0,391	0,422	0,434	0,365	0,465	0,437
	$\delta a, \text{мм}^2/\text{с}$	0,024	0,013	0,026	0,012	0,041	0,019	0,030	0,039
	$a_8, \text{мм}^2/\text{с}$	0,422 ± 0,025							
	$a^*, \text{мм}^2/\text{с}$	0,412 ± 0,015							

Экспериментально на пластине 100×100 мм толщиной $\delta = 2$ мм из малоуглеродистой стали Ст3 была проведена серия экспериментов в 2D-геометрии. Путем описанной выше покадровой обработки ИК-изображений и усреднения T для каждой изотермы по углу $\varphi = 360^\circ$ были установлены радиальные зависимости $T(r)$ в разные моменты времени t от начала нагрева. В результате обработки нескольких сотен изотерм описанным способом получено среднее значение $a = (12,54 \pm 0,27) \text{мм}^2/\text{с}$. Оно совпадает с табличным значением для величины a малоуглеродистых сталей, а среднеквадратичное отклонение составляло всего $\pm 2\%$. Воспользовавшись соотношением $\lambda = arc_p$, измеренным значением $a = 12,54 \text{мм}^2/\text{с}$ и табличными значениями материальных констант для стали Ст3 – плотность $\rho = 7870 \text{кг}/\text{м}^3$ и удельная теплоемкость $c = 486 \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, найдено расчетное значение $\lambda = 48 \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, также совпадающее с табличным.

Два варианта предлагаемого способа определения величины a дополняют друг друга. Модель сферического фронта применима к любому образцу достаточных линейных размеров (минимально $\sim 10r_0$) и требует небольшого времени измерения порядка десятков времен Фурье для пятна нагрева (обычно – доли или единицы секунд). Модель цилиндрического фронта успешнее работает в хорошо теплопроводящих материалах, однако требует большего времени

(обычно нескольких десятков секунд) и накладывает ограничения на толщину образца δ .

Таким образом, в работе описан новый экспрессный безобразцовый и неразрушающий способ исследования и определения ТФХ, пригодный как для массивных объектов, так и тонких пластин, включая крупногабаритные детали и элементы готовых изделий без вырезки из них образцов определенной формы и размеров. Экспериментальное тестирование показало, что определенные этим способом значения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности с хорошей точностью совпадают с известными табличными значениями или значениями, измеренными независимым методом.

Описанный подход можно рассматривать как дальнейшее развитие стандартизованного метода лазерной вспышки. Низкая погрешность при невысоких требованиях к условиям измерений в значительной мере обусловлена возможностями анализа не однократно регистрируемой функции одного аргумента $T(t)$ в каждом отдельном опыте, а большого ансамбля первичных данных – в виде двухпараметровой матрицы $T(r, t)$, причем зависимость $T(r)$ при $t = \text{const}$ получают путем усреднения данных по десяткам-сотням точек, находящихся на одинаковом расстоянии от центра пятна нагрева. Регистрация пространственно-временной динамики теплового поля позволяет проводить двойное усреднение данных термографии – сначала при $r = \text{const}$ по углу φ (вплоть до $\varphi = 360^\circ$ относительно центра пятна нагрева) путем обработки сигналов с нескольких десятков или сотен пикселей, а затем – по времени путем анализа нескольких сотен кадров ИК-изображения контролируемого участка поверхности. Благодаря простоте и скорости получения конечного результата он может быть встроен в производственные линии для *in situ*-контроля качества продукции или внелабораторного контроля готовых изделий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-19-00181 (проведение экспериментов и обработка данных), РФФИ, грант № 17-48-680817 (разработка аналитических и компьютерных моделей) и Министерства науки и образования РФ, проект № 16.2100.2017/4.6 (изготовление и отладка оригинального пилотного прибора). Экспериментальные результаты были получены на оборудовании ЦКП ТГУ им. Г. Р. Державина.

Список использованных источников

1. Temperature diffusivity measurement and nondestructive testing not requiring extensive sample preparation and using stepwise point heating and IR thermography / D. Yu. Golovin, A. G. Divin, A. A. Samodurov, A. I. Tyurin, Yu. I. Golovin // In book: Contemporary Issues in Non-destructive Testing and Evaluation. IntechOpen. London. – 2019. – P. 1 – 26.

Ю. Г. Кокунько

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

КАСКАДНЫЙ СИНТЕЗ ИНВАРИАНТНОЙ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ДЛЯ БПЛА

Аннотация. Разработана декомпозиционная процедура синтеза системы управления движением центра масс беспилотного летательного аппарата при действии внешних неконтролируемых возмущений с использованием сигмоидальных обратных связей. Для оценивания вектора скорости по измерению траекторных координат центра масс используется наблюдатель пониженного порядка с кусочно-линейными корректирующими воздействиями.

Yu. G. Kokunko

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia)

CASCADE SYNTHESIS OF INVARIANT TRACKING SYSTEM FOR UAV

Abstract. A decomposition procedure has been developed for synthesizing the motion control system of the center of mass of an unmanned aircraft under the action of external uncontrollable disturbances using sigmoidal feedback. To estimate the velocity vector for measuring the trajectory coordinates of the center of mass, a low order observer with piecewise linear corrective actions is used.

1. Введение. Разработка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с автоматическим управлением является перспективным направлением военной и гражданской авиации. В работах, посвященных синтезу систем автоматического управления ЛА, как правило, в законе управления используется весь вектор состояния, подлежащий прямым измерениям, а модель объекта расширяется за счет ввода автономных динамических моделей, имитирующих действие внешних возмущений [1]. В данной работе в рамках блочного подхода [2, 3] рассматривается проблема синтеза системы слежения для БПЛА в условиях неполных измерений и действия внешних неконтролируемых возмущений. В отличие от стандартных линейных локальных связей и истинных управлений используются всюду ограниченные, гладкие сигмоидальные управления, которые позволяют обеспечить инвариантность по отношению к внешним возмущениям с наперед заданной точностью. Предложенный подход не требует расширения пространства состояния за счет экзогенных динамических моделей внешних воздействий. Для информационного обеспечения базового закона управления используется наблюдатель пониженного порядка с кусочно-линейными корректирующими воздействиями, который по измерениям траекторных

координат позволяет получить с заданной точностью оценки координат вектора скорости.

2. Описание модели объекта управления. Постановка задачи. Рассматривается пространственное движение центра масс БПЛА, описываемое нелинейной динамической системой шестого порядка с использованием траекторной системы координат [4]:

$$\begin{aligned} \dot{L} &= V \cos \vartheta \cos \psi, \quad \dot{H} = V \sin \vartheta, \quad \dot{Z} = -V \cos \vartheta \sin \psi; \\ \dot{V} &= (u_1 - \sin \vartheta)g + \eta_1(t); \\ \dot{\vartheta} &= \frac{(u_2 - \cos \vartheta)g}{V} + \eta_2(t), \quad \dot{\psi} = -\frac{gu_3}{V \cos \vartheta} + \eta_3(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где L – продольная дальность; H – высота; Z – боковое смещение; V – путевая скорость; ϑ – угол наклона траектории; ψ – угол курса; g – ускорение свободного падения; $u_1 = n_x$, $u_2 = n_y \cos \gamma$, $u_3 = n_y \sin \gamma$ – управляющие воздействия, выраженные через продольную n_x и поперечную n_y перегрузки, а также угол крена γ вектора перегрузки, $|\gamma| < \pi$; $\eta_1 = \text{col}(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ – вектор внешних детерминированных возмущений.

Введем обозначения для выходных переменных системы (1): $y_{11} = L$, $y_{12} = H$, $y_{13} = Z$. Учитывая, что в режиме полета $V(t) > 0$, $|V(t)| \leq \bar{V}$, $t \geq 0$, $|\vartheta(t)| < \pi/2$, $|\psi(t)| < \pi/2$, выполним диффеоморфную замену локальных координат:

$$y_{21} = V \cos \vartheta \cos \psi, \quad y_{22} = V \sin \vartheta, \quad y_{23} = -V \cos \vartheta \sin \psi, \quad (2)$$

и представим систему (1) в каноническом виде:

$$\dot{y}_1 = y_2, \quad \dot{y}_2 = fg + B(\vartheta, \psi)u + C(V, \vartheta, \psi)\eta, \quad (3)$$

где $\det B \equiv g^3 \neq 0$,

$$f = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B = g \begin{pmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & -\sin \vartheta \cos \psi & \sin \psi \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ -\cos \vartheta \sin \psi & \sin \vartheta \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}, \quad C = B \frac{1}{g} \text{diag}(1, V, -V \cos \vartheta).$$

Для системы (3) рассматривается проблема отслеживания выходными переменными $y_{1i}(t)$ заданных сигналов $y_{1d}(t) = \text{col}(y_{11d}, y_{12d}, y_{13d})$ в следующих предположениях:

- для переменных состояния и управлений имеют место проектные ограничения $|y_{2i}(t)| \leq \bar{V}$, $|\dot{y}_{2i}(t)| \leq \bar{Y}_{2i}$, $|u_i(t)| \leq U_i$, $t \geq 0$, $i = \overline{1, 3}$;
- прямым измерениям доступны только траекторные координаты $y_1(t)$, шумы в измерениях отсутствуют; аналитический вид задающих воздействий $y_{1d}(t)$ не известен, имеются только их текущие значения;

– автономные динамические модели, имитирующие внешние воздействия, в построения не вводятся, сигналы $\eta_i(t)$, $\dot{y}_{1id}(t)$, $\ddot{y}_{1id}(t)$, $t \geq 0$, $i = \overline{1,3}$, полагаются неизвестными функциями времени, ограниченными известными константами:

$$|\eta_i(t)| \leq N_i < U_i, |\dot{y}_{1id}(t)| \leq Y_{2id} \leq \bar{V}, |\ddot{y}_{1id}(t)| \leq \bar{Y}_{2id} \leq \bar{Y}_{2i}, t \geq 0, i = \overline{1,3}. \quad (4)$$

В этих предположениях ставится задача синтеза динамической обратной связи, обеспечивающей стабилизацию ошибок слежения $e_{li}(t) = y_{li}(t) - y_{1id}(t)$, $i = \overline{1,3}$ с заданной точностью

$$|e_{li}(t)| \leq \delta_{li}, t > T > 0, i = \overline{1,3}, \quad (5)$$

что обеспечивает вывод центра масс БПЛА на заданную пространственную траекторию и его движение в малой окрестности данной кривой. Данная задача включает, во-первых, синтез базового закона управления, удовлетворяющего проектным ограничениям и обеспечивающего инвариантность по отношению к внешним возмущениям; во-вторых, синтез наблюдателя для оценивания неизмеряемых сигналов, требуемых для формирования обратной связи.

3. Синтез базового закона управления. Задачу управления будем решать в рамках блочного подхода [2, 3], но для соблюдения ограничений на управляющие воздействия вводятся всюду ограниченные сигмоидальные функции [2]. Сигма-функция $\sigma(kx) = 2/(1 + \exp(-kx)) - 1$ имеет S-образную форму и является гладкой допредельной реализацией разрывного управления. В указанных интервалах для сигма-функции и ее производной $\sigma'(kx) = 0,5k(1 - \sigma^2(kx))$ имеем [5, 6]:

$$\begin{aligned} \sigma(k\delta) < |\sigma(kx)| < 1, |x| > \delta > 0; \\ \frac{\sigma(k\delta) |x|}{\delta} \leq |\sigma(kx)| \leq \sigma(k\delta), 0 < \sigma'(k\delta) \leq \sigma'(kx) \leq \sigma'(0) = 0,5k, |x| \leq \delta. \end{aligned} \quad (6)$$

Из выражений (6) следует, что при $|x| > \delta$ сигма-функция близка к постоянной функции, а при $|x| \leq \delta$ – к линейной. В качестве границы разделения при $x \geq 0$ примем точку $k\delta = c$, где $\pm c \approx \pm 3$ – абсциссы вершин сигма-функции, в которых ее кривизна достигает максимума, при этом $\sigma(\pm 3) \approx \pm 0,9$, $\sigma'(\pm 3) \approx 0,1k$.

Запишем систему (3) относительно ошибок слежения и введем сигмоидальные виртуальные и истинные управления. С учетом обозначений

$$\begin{aligned} e_2 &= y_2 + M_1 \sigma(K_1 e_1), \\ u &= -B^{-1}(\vartheta, \psi)(fg + 0,5M_1 K_1 \Lambda(e_2 - M_1 \sigma(K_1 e_1)) + M_2 \sigma(K_2 e_2)), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\sigma(K_j e_j) = \text{col}(\sigma(k_{j1} e_{j1}), \sigma(k_{j2} e_{j2}), \sigma(k_{j3} e_{j3}))$, $M_j = \text{diag}(M_{ji})$, $j = 1, 2$, $M_{ji}, k_{ji} = \text{const} > 0$, $\Lambda = \text{diag}(1 - \sigma^2(k_{1i} e_{1i}))$, $i = 1, 2, 3$, получим замкнутую систему

$$\dot{e}_1 = -M_1\sigma(K_1e_1) + e_2 - \dot{y}_{1d}, \quad \dot{e}_2 = -M_2\sigma(K_2e_2) + \varphi_2, \quad (8)$$

где $\varphi_2 = C(V, \mathfrak{g}, \psi)\eta - 0,5M_1K_1\Lambda\dot{y}_{1d}$, $|\varphi_{2i}| \leq \sum_{m=1}^3 C_{im}\eta_m + 0,5M_{1i}k_{1i}\bar{Y}_{2di} = \bar{\varphi}_{2i}$, $i = \overline{1,3}$.

Точность, которую требуется обеспечить при стабилизации переменных системы (8), обуславливает неравенства для выбора больших коэффициентов:

$$|e_{ji}| \leq 3/k_{ji} \leq \delta_{ji} \Rightarrow k_{ji} \geq 3/\delta_{ji}, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, 2, 3. \quad (9)$$

Достаточные условия сходимости невязок в указанные области (9) обеспечиваются соответствующим выбором амплитуд сигма-управлений на основе неравенств, полученных при анализе производной квадратичной формы: $V = V_1 + V_2$, где $V_1 = \frac{1}{2}e_1^T e_1$, $V_2 = e_2^T e_2$, с учетом (6) – (9):

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1^T \dot{e}_1 = e_1^T (-M_1\sigma(K_1e_1) + e_2 - \dot{y}_{1d}) \leq \sum_{i=1}^3 |e_{1i}| (|e_{2i}| + \bar{Y}_{2di} - 0,9M_{1i}); \\ \dot{V}_2 &= e_2^T \dot{e}_2 = e_2^T (-M_2\sigma(K_2e_2) + \varphi_2) \leq \sum_{i=1}^3 |e_{2i}| (\bar{\varphi}_{2i} - 0,9M_{2i}). \end{aligned}$$

Неравенства $\dot{V}_{1,2} < 0$ обеспечиваются вне областей (5), (9) в указанное время: $M_{2i} > 1,1\bar{\varphi}_{2i} \Rightarrow |e_{2i}(t)| \leq \delta_{2i}$, $t > t_2$, $M_{1i} > 1,1(\bar{Y}_{2di} + \delta_{2i}) \Rightarrow |e_{1i}(t)| \leq \delta_{1i}$, $t > t_1 > t_2$, $i = \overline{1,3}$, что обеспечивает решение поставленной задачи (5).

Решение задачи наблюдения. По измерениям обобщенных координат $y_1(t)$ ставится задача наблюдения переменных $y_2(t)$. В отличие от стандартных редуцированных наблюдателей предлагается отбросить динамику неизмеряемых переменных и построить наблюдатель пониженного порядка на основе первого уравнения системы (3):

$$\dot{z} = v(\varepsilon),$$

где $z \in R^3$ – вектор состояния; $v = \text{col}(v_1, v_2, v_3)$ – вектор корректирующих воздействий наблюдателя; $\varepsilon = y_1 - z \in R^3$ – вектор ошибок наблюдения. Задача наблюдения сводится к задаче стабилизации с заданной точностью ошибок наблюдения и их производных $\dot{\varepsilon} = y_2 - v$:

$$|\varepsilon_i(t)| \leq \alpha \quad \forall t > t_{01} \geq 0, \quad i = \overline{1,3}, \quad |\dot{\varepsilon}_i(t)| = |y_{2i}(t) - v_i(t)| \leq \alpha \quad \forall t > t_0 > t_{01}, \quad t_0 < t_2. \quad (10)$$

При $t > t_0$ корректирующие воздействия служат оценками «внешнего возмущения» $v_i(t) = y_{2i}(t) \pm \alpha$ и используются для вычисления смешанной пе-

ременной $\tilde{e}_2 = v + M_1\sigma(K_1e_1)$ (5) и элементов матрицы $B^{-1}(\vartheta, \psi)$. В силу выражений (2) при ограничении $v_1^2(t) + v_3^2(t) \neq 0$ имеем:

$$\tilde{V} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2}, \quad \sin \tilde{\vartheta} = \frac{v_2}{\tilde{V}}, \quad \cos \tilde{\vartheta} = \sqrt{1 - \frac{v_2^2}{\tilde{V}^2}}, \quad \cos \tilde{\psi} = \frac{v_1}{\tilde{V} \cos \tilde{\vartheta}}, \quad \sin \tilde{\psi} = -\frac{v_3}{\tilde{V} \cos \tilde{\vartheta}}.$$

В замкнутой системе с наблюдателем закон управления (7) реализуется в виде

$$u = -B^{-1}(\tilde{\vartheta}, \tilde{\psi})(fg + 0,5M_1K_1\Lambda(\tilde{e}_2 - M_1\sigma(K_1e_1) + M_2\sigma(K_2\tilde{e}_2)))$$

и обеспечивает вывод центра масс на пространственную траекторию и движение в ее заданной окрестности (5).

Целесообразно использовать S -образные корректирующие воздействия, которые можно выбрать в виде негладких кусочно-линейных sat-функций [3]:

$$v_i = P_i \text{sat}(l_i \varepsilon_i), \quad P_i, l_i = \text{const} > 0, \quad i = \overline{1,3}, \quad P_i \text{sat}(l_i \varepsilon_i) = \begin{cases} P_i \text{sign} \varepsilon_i, & |\varepsilon_i| > 1/l_i; \\ P_i l_i \varepsilon_i, & |\varepsilon_i| \leq 1/l_i. \end{cases} \quad (11)$$

Амплитуды $P_i > \bar{V}$ (11) выбираются из достаточных условий $\varepsilon_i \dot{\varepsilon}_i < 0$ так, чтобы при $|\varepsilon_i(0)| > 1/l_i$ за конечное время попасть в линейную зону, а при $|\varepsilon_i(0)| < 1/l_i$ – не выйти из нее. Выбором l_i обеспечивается заданная точность оценивания (10): $|\varepsilon_i| \leq 1/l_i \leq \alpha \Rightarrow l_i \geq 1/\alpha, \quad i = \overline{1,3}$.

Заключение. Основной результат работы – процедуры синтеза системы управления БПЛА с сигмоидальными обратными связями, обеспечивающими выполнение проектных ограничений, и наблюдателя состояния пониженного порядка, не требующего расширения пространства состояний за счет моделей внешних воздействий. Результаты моделирования подтвердили эффективность разработанных алгоритмов.

Список использованных источников

1. Андриевский, Б. Р. Современные направления синтеза систем автоматического управления ЛА / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков // Известия РАН. ТиСУ. – 2004. – № 2. – С. 126 – 136.
2. Краснова, С. А. Иерархический синтез сигмоидальных обобщенных моментов манипулятора в условиях неопределенности / С. А. Краснова, А. С. Антипов // Проблемы управления. – 2016. – № 4. – С. 10 – 21.
3. Краснова, С. А. Блочный подход к анализу и синтезу инвариантных нелинейных систем слежения / С. А. Краснова, В. А. Уткин, А. В. Уткин // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 12. – С. 26 – 53.

4. Канатников, А. Н. Терминальное управление пространственным движением летательных аппаратов / А. Н. Канатников, А. П. Крищенко // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 5. – С. 51 – 64.

5. Краснова, С. А. Сигма-функция в задачах синтеза наблюдателей состояний и возмущений / С. А. Краснова, А. В. Уткин // Проблемы управления. – 2015. – № 5. – С. 27 – 36.

6. Краснова, С. А. Каскадный синтез наблюдателя состояния с нелинейными корректирующими воздействиями / С. А. Краснова, Н. С. Мысик // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 2. – С. 106 – 128.

А. А. Шнайдер, С. А. Мартиросов, Ю. В. Алферов, А. В. Семенюк
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ,
Тамбов, Россия)

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ SDR ДЛЯ АНАЛИЗА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ БПЛА

Аннотация. В работе приводится применение технологии SDR для анализа радиоэлектронной обстановки оператором радиоразведки при управлении БПЛА.

A. A. Shnayder, S. A. Martirosov, Yu. V. Alferov, A. V. Semenyuk
(Interspecific Center for Training and Combat Use of EW Troops,
Tambov, Russia)

ISSUES OF USING SDR FOR THE ANALYSIS OF THE ELECTRONIC ENVIRONMENT IN UAV CONTROL

Abstract. The paper presents the application of SDR technology for the analysis of the electronic environment by a radio reconnaissance operator when controlling a UAV.

Эффективное функционирование беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самостоятельно или в составе стаи БПЛА предполагает безопасное управление им при отсутствии оператора, который непрерывно им управляет. БПЛА – это сложный объект управления, на который возлагаются различные целевые задачи, такие как мониторинг оперативной обстановки конкретной территории, ретрансляция служебной информации по каналу связи и др.

Для обеспечения устойчивости управления БПЛА необходим своевременный анализ радиоэлектронной обстановки в зоне действия данного БПЛА. Данная задача решается наличием на борту БПЛА бортовой и стационарной подсистем, которые обеспечивают помехозащищенную радиосвязь и передачу данных между БПЛА и пунктом управления. Стационарная подсистема ото-

бражения в свою очередь должна обеспечивать интерфейс оператора при управлении, контроле БПЛА и получении информации от бортовых средств [1]. Анализ радиоэлектронной обстановки может быть осуществлен с применением концепции *SDR*.

Программно-конфигурируемая радиосистема (англ. *Software Defined Radio – SDR*) – это радиосистема, в которой все или большинство функций физического уровня выполняются в программном виде, а функции, выполняемые аппаратно, должны оперативно модифицироваться по требованиям рабочего стандарта связи.

Задача демодуляции при этом выполняется в цифровом виде, что позволяет приемнику работать с разными видами сигналов на основе одной и той же аппаратной части. Это делает технологию *SDR* экономически выгодной и гибкой.

В классическом виде в состав радиосистемы *SDR* входят следующие элементы: источник питания, антенна, широкополосный преобразователь частоты, АЦП/ЦАП и процессор с интерфейсами связи. При этом функции, которые традиционно выполняют смесители, фильтры и демодуляторы, реализуются программно согласно параметрам модулированных сигналов и стандартов связи. Вычислительные функции *SDR* могут реализовываться с помощью различных устройств. Это может быть процессор общего назначения, цифровой сигнальный процессор, а при необходимости в большей производительности – программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) или интегральная схема общего назначения [2].

Технология *SDR* позволяет производить разработку приемо-передающей аппаратуры, которая может обеспечивать поддержку большого количества стандартов связи. Адаптация *SDR*-устройства под другие стандарты связи выполняется только программными методами и не несет за собой изменения в аппаратной части. Отличительными особенностями таких устройств являются:

- сверхширокополосная и малощумящая радиочастотная часть, обладающая большим динамическим диапазоном;
- высокоскоростной тракт аналого-цифрового преобразования с большим динамическим диапазоном;
- сигнальный процессор, обладающий большой вычислительной мощностью;
- специализированный цифровой тракт фильтрации [3].

Функциональная схема программно-определяемого радио включает программную часть, выполняющую большую часть функций по обработке сигналов и управлению аппаратной частью, и аппаратную часть, выполняющую функции, недоступные для программной реализации. Программное выполнение таких радиотехнических функций, как фильтрация, модуляция/демодуляция, формирование модулированного сигнала, детектирование модулированного

сигнала, реализовано и в существующих радиостанциях. Программно-конфигурируемое радио требует реализации этих функций для сигналов различных стандартов связи, т.е. с различной несущей частотой, шириной канала, типом модуляции и скоростью передачи информации.

Архитектура программной части *SDR* состоит из пяти элементов.

Функция программной части *SDR* сводится к распределению ресурсов аппаратных средств для их использования различными приложениями связи.

Первым этапом является обеспечение взаимодействия *SDR*-приемника с персональным компьютером. При этом необходимо обеспечить взаимодействие с ПК большинства используемых ныне *SDR*-устройств. Программное обеспечение *Zadig* позволяет в автоматическом режиме установить драйвера на используемый *SDR*-устройством интерфейс (в ОС *Windows 7* – интерфейс *Bulk-In, Interface 1*).

Реализация большого количества типов модуляции позволяет оператору работать с большим количеством сигналов, представляющих интерес при анализе радиоэлектронной обстановки. Библиотека *Liquid* реализует функции цифрового сигнального процессора (*DSP – Digital Signal Processor*), обладая необходимым набором функций для обработки сигналов с различными видами модуляции. Необходимо добавить, что требуется реализация алгоритмов модуляции как аналоговых, так и цифровых сигналов.

Реализация аудиопотока и функций для работы с ним позволяет оператору прослушать принимаемый сигнал, а также в случае необходимости сохранить аудиозапись сигнала для дальнейшей обработки. Для эффективной работы с аудиопотоками необходима реализация функций, реализующих своевременную активацию, выключение и уничтожение аудиопотока. Также необходима реализация мьютекса, позволяющего разграничить доступ определенного потока к вычислительным ресурсам компьютера. Это позволяет избежать возникновения ошибок при обращении к памяти или ресурсам процессора.

Визуализация данных предоставляет оператору в реальном времени отслеживать состояние сигнала и его изменения. Для этого необходимы реализации классов, определяющие функционирование и графическое отображение спектра полосы частот, амплитудно-временной характеристики (водопада), а также выделенной полосы частот, определяемой в соответствии с выбранным видом модуляции сигнала. Также важным элементом является графический интерфейс, предоставляющий оператору необходимые ему функции для работы с сигналами, в удобном виде.

Архитектура программной части *SDR* представлена на рис. 1.

Данная архитектура представляет собой минимальный набор компонентов, описывающих функционирование программного обеспечения, реализующего обработку цифровой информации с *SDR*-приемника.

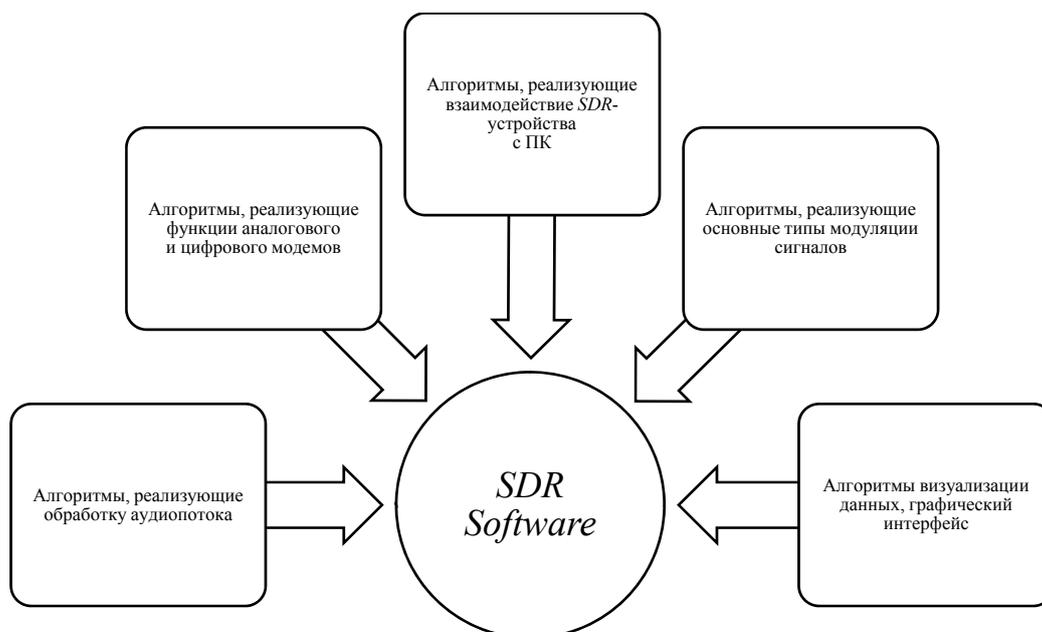


Рис. 1. Архитектура программного обеспечения *SDR*

Применение технологии *SDR* позволяет принимать и передавать сигналы с использованием различных частот и стандартов, выбор которых зависит от самых разных факторов. Данная концепция позволяет заменить огромное разнообразие существующих и разрабатываемых конструкций радиоприемников и трансиверов, как серийных, так и любительских, на ограниченное число доступных аппаратных блоков, работающих под управлением специально разработанного программного обеспечения. Это приведет к упрощению и удешевлению конструкций, значительному улучшению характеристик, поддержке любых видов модуляции, появлению большого количества сервисных функций. Это стало возможно с появлением доступных быстрых ЦАП/АЦП и снижением стоимости персональных ЭВМ и *DSP*.

Несмотря на то, что уже существует программная поддержка для устройств *SDR*, существующие программные решения обладают рядом недостатков. К их числу можно отнести большое количество занимаемой памяти, большое количество неиспользуемых или малоиспользуемых функций, замусоренность кода. В связи с этим возникает необходимость в разработке комплекса программных средств, реализующих функции программно-определяемой радиосистемы, обладающей «дружественным» интерфейсом и включающей функции, необходимые оператору БПЛА для оперативного решения задач по мониторингу радиоэлектронной обстановки.

Таким образом, программное обеспечение для устройства, поддерживающего технологию *SDR*, позволит оператору пункта управления БПЛА проводить постоянный мониторинг радиочастотного диапазона на предмет обнаружения несанкционированных излучений, являющихся помехами для сигналов управления БПЛА.

Список использованных источников

1. Ищук, В. И. Принцип построения радиоэлектронного оборудования комплексов с беспилотными летательными аппаратами ВМФ / В. И. Ищук, В. А. Мочалов // Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами. – 2016. – С. 95 – 100.

2. Рябов, И. В. Принципы программно-определяемых радиосистем и их применение в рамках задачи исследования метеорной радиосвязи / И. В. Рябов, С. В. Толмачев, А. А. Лебедева // Технические науки. – 2016. – № 7. – С. 59 – 66.

3. Малыгин, Д. В. Бортовой радиотехнический комплекс «Полиморф» многоцелевой платформы «Синергия» блочно-модульного типа / Д. В. Малыгин // Малые космические аппараты: производство, эксплуатация и управление. – 2017. – С. 377 – 379.

П. М. Трефилов, К. А. Кулагин, А. Н. Мигачев

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

ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ПОЛИГОНОВ ДЛЯ ОТРАБОТКИ СЦЕНАРИЕВ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ БПЛА МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ТИПА

Аннотация. В данной статье рассмотрен подход к получению информации с виртуального полигона для отработки сценариев группового управления беспилотными летательными аппаратами мультикоптерного типа. Предложенный подход отличается от существующих тем, что по результатам полета в полигоне возможно формирование полетного задания для реального БПЛА.

P. M. Trefilov, K. A. Kulagin, A. N. Migachev

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia)

APPLICATION OF VIRTUAL POLYGONS FOR OPERATION OF SCENARIOS OF GROUP MANAGEMENT OF UAV MULTICOPTER TYPE

Abstract. This article describes the approach to obtaining information from a virtual training ground for working out multicopter unmanned aerial vehicle group control scenarios. The proposed approach differs from the existing ones in that according to the results of the flight in the training ground, it is possible to form a flight task for a real UAV.

Введение. На сегодняшний день подавляющее большинство существующих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) потребительского сегмента являются управляемыми. Такое управление подразумевает наличие оператора, а также непрерывный контроль самого БПЛА. Такой подход не актуален при

применении БПЛА в монотонных работах, например: облет многогектарных сельскохозяйственных и лесных угодий, внесение удобрений и др. [1]. Так же стоит отметить, что большинство неудачных полетов, закончившихся авариями, были связаны с человеческим фактором, а именно: не правильно поданные команды на БПЛА, отсутствие навыка у оператора в управлении, недочет факторов окружающей среды, перепадов высот и особенностей рельефа местности. При решении полетных заданий необходимо учитывать, что оператору и вычислителю на борту БПЛА необходимо получать и обрабатывать большое количество сигналов, поступающих с датчиков и сенсоров (параметрические данные, телеметрия, энергоемкость и другие). Зачастую эта информация разнородна, что усложняет систему и усложняет вычислительные процессы, так же увеличивает нагрузку на оператора. Оптимизировать эти условия в целях экономии ресурсов возможно с помощью смоделированной параметрической среды (виртуальный полигон).

Постановка задачи. При использовании БПЛА в автоматическом режиме основополагающей задачей является грамотное планирование маршрута. Логистика передвижений должна формироваться не только из поставленных задач, но и учитывать тактико-технические характеристики БПЛА, энергоемкость, рельеф местности, скорость передвижения, погодные условия. В настоящее время существует большое количество сред моделирования и прокладки маршрутов для БПЛА, но те или иные среды прокладки маршрутов имеют свои недостатки, например отсутствие информации о высоте рельефа местности.

Но проблема формирования маршрутов еще более существенна в полете нескольких БПЛА, которые нуждаются в одноранговом взаимодействии.

Описание решения. Для удобства решения поставленных задач, а также исключения человеческого фактора и применения физических БПЛА авторами разработан виртуальный полигон для отработки сценариев группового управления, который позволяет моделировать траектории движения и взаимодействие [2]. Главным преимуществом данного полигона служит то свойство, что данные, полученные в ходе полета, могут быть загружены в реальный БПЛА для повторения маршрута. Для реализации виртуального полигона используется специальное программное обеспечение, обладаемое инструментами для разработки дизайна, симуляции и визуализации объектов. Их преимуществом среди других сред является то, что они рассчитаны на работы с большими объемами графических материалов, 3D-моделей, а также хорошо настраиваемой физикой поведения объекта. Сам полигон состоит из полученных ранее ортофотопланов с восстановленным рельефом местности. Стоит учитывать, что основная задача полигона – это максимально приближенный рельеф местности и динамические характеристики БПЛА, а не графическое отображение, но при накладывании рельефа возможно образование «артефактов», отображенных на рис. 1.



Рис. 1. Модель ИПУ РАН в виртуальном полигоне

Алгоритм формирования виртуального полигона (рис. 2) состоит в следующем: вводится математическая модель БПЛА с описанием его динамических характеристик. Затем производится формирование виртуальной среды и программирование ее параметров, таких как тип рельефа (жидкость, твердое тело), формирование метеорологических условий (на данном этапе в тестовом режиме) и отработка полетного задания с последующим переносом на реальный аппарат.

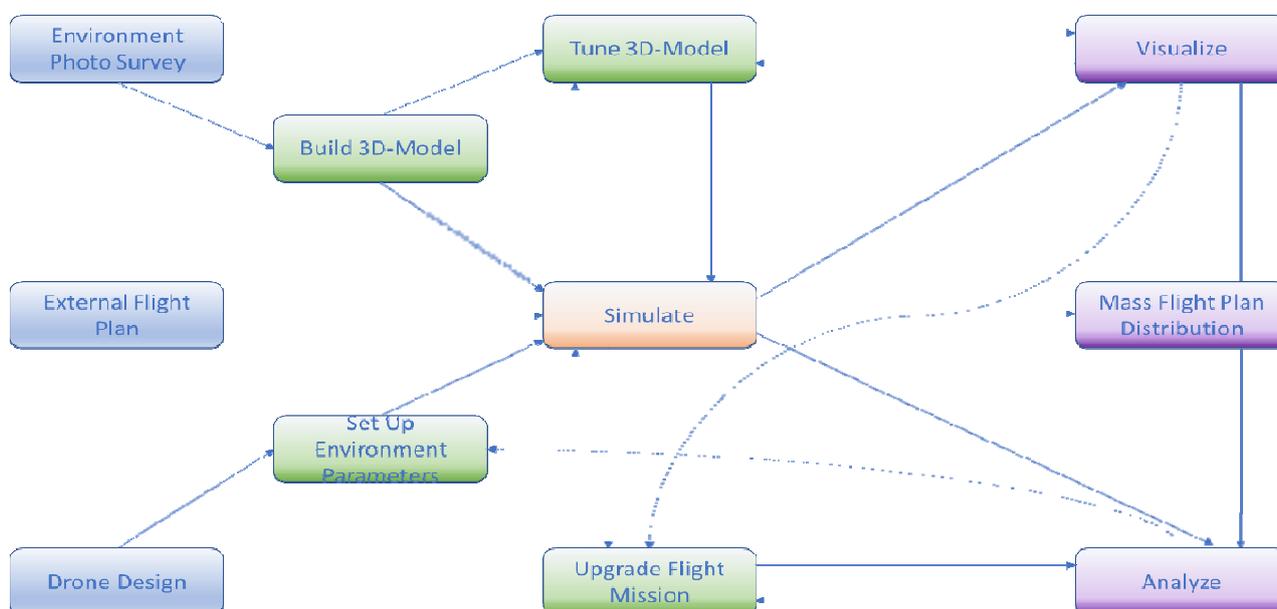


Рис. 2. Моделирование виртуального полигона

После формирования виртуального полигона, БПЛА и элементов окружающей среды необходимо сформировать взаимодействие между БПЛА для алгоритмов роевого управления. На данный момент в виртуальном полигоне

реализована функция однорангового взаимодействия между БПЛА, когда ведущий БПЛА передает свои координаты соседним, а те в свою очередь движутся с заданной дистанцией. На текущей версии возможно следование за управляемым БПЛА и удержание дистанции группы БПЛА относительно друг друга.

Процесс управления БПЛА в виртуальном полигоне осуществляется с помощью клавиатуры или других контроллеров. Так же для достижения более высокого уровня точности при управлении БПЛА возможно подключение очков виртуальной реальности. В процессе перемещения записываются данные о текущем местоположении и скорости перемещения БПЛА. После получения маршрута можно отредактировать его: изменить скорость, траекторию движения (рис. 3).

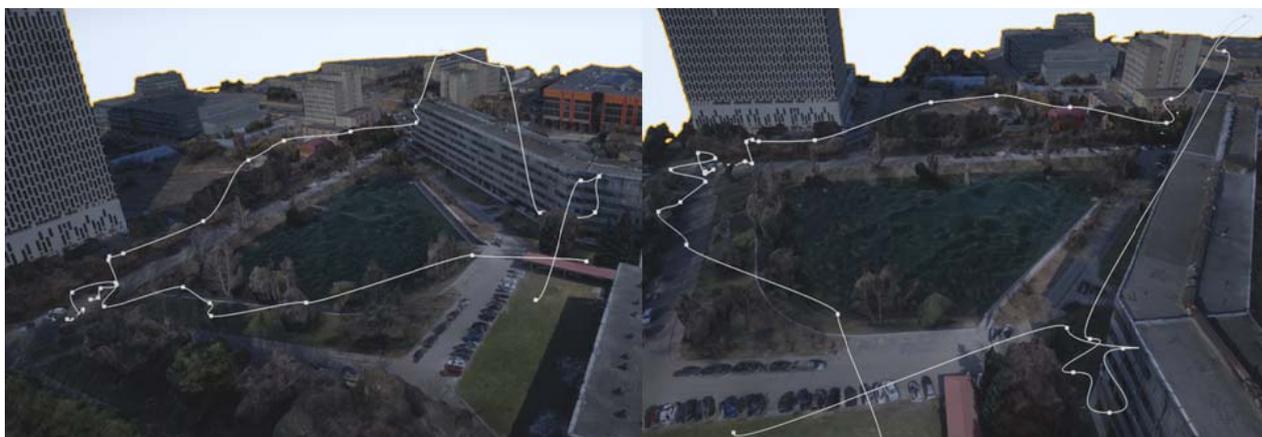


Рис. 3. Первичный и скорректированные маршруты полета в виртуальном полигоне

Выводы. Создание виртуальных полигонов может значительно снизить расходы на выстраивание технологического процесса для отработки различных методов и алгоритмов группового управления роботами в многоагентной робототехнической системе. Такой подход способен не только отрабатывать сценарии группового управления, но и обучить оператора для недопущения ошибок при управлении реальными БПЛА. В дальнейшем планируется добавить многосредность и более сложную модель окружающего мира и БПЛА. Так же планируется расширить возможность сценариев роевого управления, добавить возможность создания помех спутникового сигнала.

Список использованных источников

1. Федосеева, Н. А. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов / Н. А. Федосеева, М. В. Загвоздкин // Научный журнал. – 2017. – № 9(22). – С. 26 – 29.
2. Галин, Р. Р. Использование виртуального полигона для отработки взаимодействия роботов в многоагентной робототехнической системе / Р. Р. Галин, К. А. Кулагин // Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем : тр. 2-й Междунар. науч. конф. – 2018. – С. 208 – 212.

Д. В. Краснов

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

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МАНИПУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Аннотация. Для полноприводного трехзвенного робота-манипулятора разработан закон разрывного управления, обеспечивающий заданное движение конечной точки инвариантно по отношению к внешним и параметрическим возмущениям. Выполнена оценка кинематической погрешности при использовании в контуре обратной связи динамического наблюдателя состояния и возмущений.

D. V. Krasnov

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia)

ESTIMATION OF THE ERROR OF POSITIONING OF THE MANIPULATOR IN SYSTEMS WITH DYNAMIC FEEDBACK

Abstract. For the all-wheel-drive three-link robot-manipulator, a discontinuous-control law has been developed that ensures a given motion of the end point is invariant with respect to external and parametric perturbations. The kinematic error is estimated when a dynamic state observer and disturbances are used in the feedback loop.

1. Введение. Прогресс в современной робототехнике связан в первую очередь с совершенствованием информационно-управляющих систем и разработкой эффективных алгоритмов управления. Классические методы синтеза обратной связи в электромеханических системах предполагают наличие полного комплекта измерительных устройств. Однако не все параметры объекта управления и среды его функционирования, необходимые для управления движением и ориентацией робота в рабочем пространстве, могут быть непосредственно измерены. Кроме того, системы с полным комплектом датчиков имеют высокую стоимость и недостаточно надежны, так как при выходе из строя измерительных устройств система управления теряет работоспособность вплоть до возникновения аварийной ситуации. На практике можно отказаться от части измерительных устройств или сохранить работоспособность системы при их поломке, если ввести в контур обратной связи динамический наблюдатель состояния. Это алгоритмы, реализуемые в вычислительной среде, которые при определенных условиях позволяют получить оценки неизмеряемых сигналов. В условиях действия внешних неконтролируемых возмущений эта задача решается с заданной точностью, что отражается на точности управляемого процесса. В данной работе для трехзвенного робота-манипулятора с электрическими исполнительными устройствами (ИУ) рассматривается проблема синтеза динамической обратной связи при измерении только обобщенных координат и

оценивании остальных сигналов с помощью наблюдателя состояния, дается оценка кинематической погрешности.

2. Описание модели объекта управления. Постановка задачи. В качестве объекта управления рассматривается манипулятор с трехмерным вектором обобщенных координат $q_1 = (q_{11}, q_{12}, q_{13})^T$ из семейства промышленных роботов VERSATRAN, UMS-2, предназначенных для переноса грузов без управления их ориентацией [1]. На неподвижном основании размещается звено 1 (вертикальная колонна), которое вращается относительно основания (относительное угловое перемещение q_{11}). Звено 2 перемещается по вертикали относительно звена 1 (относительное линейное перемещение q_{12}), звено 3 (рука) перемещается в горизонтальной плоскости относительно звена 2 (относительное линейное перемещение q_{13}). В конечной точке (endpoint) звена 3 укреплено захватное устройство. Движение endpoint по заданной траектории (x, y, z) в цилиндрической рабочей зоне обеспечивается управлением звеньев:

$$x = q_{13} \cos q_{11}, \quad y = q_{13} \sin q_{11}, \quad z = q_{12}. \quad (1)$$

Уникальность данного механизма состоит в том, что обратная задача о положении имеет однозначное аналитическое решение, поэтому задача автоматического управления сводится к задаче слежения обобщенных координат $q_1(t)$ за заданными сигналами $g(t) = \text{col}(g_1, g_2, g_3)$, сформированными с учетом модели (1).

Каждое звено оснащается электроприводом постоянного тока с эластичным сочленением и датчиком положения звена. Динамическая модель состоит из трех взаимосвязанных подсистем, каждая из которых имеет пятый порядок [2]:

$$\dot{q}_1 = q_2, \quad \dot{q}_2 = H^{-1}(q_1)[\tau - C(q_1, q_2)q_2 + f(t)]; \quad (2)$$

$$\dot{\tau} = K(\omega - q_2), \quad \dot{\omega} = J^{-1}(\Psi i - \tau), \quad \dot{i} = L^{-1}(u - Ri - \Psi\omega), \quad (3)$$

где (1) – модель манипулятора; (2) – модель приводов постоянного тока; $H_{3 \times 3} = \text{diag}(H_i) > 0$ – матрица инерции; $C(q_1, q_2)_{3 \times 3}$ – матрица центробежных и кориолисовых сил; $f(t) = R^3$ – внешние неконтролируемые возмущения; $\tau(t) \in R^3$ – вектор обобщенных моментов, развиваемых ИУ; $\omega \in R^3$ – вектор угловых скоростей роторов электроприводов; $i \in R^3$ – вектор токов якорей; K, J, L, R, Ψ – диагональные матрицы с постоянными положительными элементами; $u \in R^3$ – вектор напряжений якорей (разрывные управления).

Робот предназначен для перемещения грузов различной массы с заданным верхним ограничением. Заранее не известно, груз какой массы перемещается, более того, в ходе выполнения работ масса груза может меняться.

Для объекта (2)–(3) с неопределенными массоинерционными характеристиками и при действии внешних несогласованных возмущений ставится задача синтеза разрывного управления по обратной связи, обеспечивающего стабилизацию ошибок слежения $e_1 = q_1 - g \in R^3$ в предположении, что известны диапазоны изменения неизвестных параметров и сигналов.

3. Синтез обратной связи и оценка точности позиционирования.

Для решения поставленной задачи в рамках блочного подхода [2, 3] разработана декомпозиционная процедура синтеза базового закона разрывного управления на основе преобразования системы (2)–(3) в эквивалентную блочную форму вход–выход относительно ошибок слежения:

$$\dot{e}_j = -K_j e_j + e_{j+1}, j = \overline{1,4}, \quad \dot{e}_5 = B(u + \varphi), \quad B_{3 \times 3} = H^{-1} K J^{-1} \Psi L^{-1} = \text{diag}(b_i) > 0, \quad (4)$$

где $e_j = \text{col}(e_{j1}, e_{j2}, e_{j3})$ – смешанные переменные, т.е. функции от переменных состояния электромеханической системы, внешних воздействий и их производных $e_2(e_1, q_2, \dot{g})$, $e_3(e_1, e_2, \tau, f, \ddot{g})$, $e_4(e_1, e_2, e_3, \omega, \dot{f}, \ddot{g})$, $e_5(e_1, \dots, e_4, i, \dot{f}, g^{(4)})$; элементы вектора $\varphi(e_1, \dots, e_5, f^{(3)}, g^{(5)}) \in R^3$ трактуются как ограниченные согласованные возмущения $|\varphi_i(t)| \leq \Phi_i$ $t \geq 0$, $i = 1, 2, 3$; выбором элементов матриц $K_j = \text{diag}(k_{ji}), k_{ji} > 0$ обеспечивается желаемый процесс сходимости ошибок слежения; b_i неизвестны и ограничены: $0 < \bar{b}_i \leq b_i(q_1) \leq \overline{b}_i(q_1)$, $i = 1, 2, 3$.

Для обеспечения инвариантности сформируем базовый (т.е. в условиях полной определенности и полных измерений) закон разрывного управления:

$$u = -K_5 \text{sign} e_5, \quad \text{sign} e_5 = \text{col}(\text{sign} e_{51}, \text{sign} e_{52}, \text{sign} e_{53}), \quad K_5 = \text{diag}(k_{5i}) > 0. \quad (5)$$

В системе (4)–(5) при выполнении условий [4] $e_{5i} \dot{e}_{5i} < 0 \Rightarrow k_{5i} > \Phi_i$, $i = 1, 2, 3$ за конечное время $t_i > 0$ переменные e_{5i} достигают поверхностей переключения $e_{5i} = 0$, $i = 1, 2, 3$. Далее движение происходит в скользящем режиме, что обеспечивает асимптотическую стабилизацию ошибок слежения:

$$e_5(t) = 0 \Rightarrow e_4(t) \rightarrow 0 \Rightarrow e_3(t) \rightarrow 0 \Rightarrow e_2(t) \rightarrow 0 \Rightarrow e_1(t) \rightarrow 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} q_1(t) = g(t). \quad (6)$$

Логическая цепочка (6) имеет место, если на многообразии $e_5 = 0$ возникает идеальный скользящий режим с бесконечно большой частотой переключений и текущие значения смешанных переменных $e_{5i}(t)$, $t \geq 0$, точно известны.

Значения $e_5(t)$ зависят от всех переменных состояния электромеханической системы $q_1, q_2, \tau, \omega, i$, внешних воздействий и их производных $g^{(j)}$, $j = \overline{0,4}$; $f^{(j)}$, $j = \overline{0,2}$. Формула для вычисления e_5 достаточно громоздка, ее реализация

требует длительного машинного времени и наличия в системе управления генераторов внешних воздействий, в которых нужно предусмотреть различные рабочие режимы и возможные изменения среды функционирования. На наш взгляд, следует отказаться от этого варианта, требующего полного комплекта датчиков и априорной формализации всех штатных режимов. Для повышения функциональности и надежности системы управления целесообразно реализовать алгоритмы управления в форме динамической обратной связи. Для получения оценок $\tilde{e}_5(t) \approx e_5(t)$ используем наблюдатель состояния [3], который строится на основе системы (4) и по измерениям $e_1(t)$ сразу даст оценки переменных $e_5(t)$, минуя их вычисление, и не требует ввода генераторов внешних воздействий. Но из-за наличия внешних и параметрических возмущений оценки будут получены с заданной точностью: $|\tilde{e}_{5i}(t) - e_{5i}(t)| \leq \alpha_i, t > t_i^* > 0, i = 1, 2, 3$.

В системе с наблюдателем состояния закон управления (5) реализуется в виде $u = -K_5 \text{sign} \tilde{e}_5$, а при $t > t_i > t_i^*$ в замкнутой системе возникнет реальный скользящий режим с большой, но конечной частотой переключений, в пограничном слое $|e_{5i}(t)| \leq \delta_i(\alpha_i, k_{5i})$, что снижает точность регулирования в установившемся режиме. Ошибки слежения сходятся в некоторые окрестности нуля и вместо цепочки (6) с точностью до затухающих собственных движений имеем:

$$\begin{aligned} |e_{5i}(t)| \leq \delta_i &\Rightarrow |e_{4i}(t)| \leq \delta_i / k_{4i} \Rightarrow |e_{3i}(t)| \leq \delta_i / (k_{4i} k_{3i}) \Rightarrow |e_{2i}(t)| \leq \delta_i / (k_{4i} k_{3i} k_{2i}) \Rightarrow \\ &\Rightarrow |e_{1i}(t)| \leq \delta_i / (k_{4i} k_{3i} k_{2i} k_{1i}) = \bar{\delta}_i \Leftrightarrow |q_{1i}(t) - g_i(t)| \leq \bar{\delta}_i, \quad i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (7)$$

Погрешность позиционирования (максимальное текущее отклонение endpoint от заданного текущего положения в установившемся режиме $T > \max\{t_i\}$) характеризует точность промышленного робота. Требование к точности позиционирования зависит от выполняемых технологических операций и находится в пределах от 0,005 до 2 мм [1]. Выполним оценку линейной кинематической погрешности $\Delta \vec{r}$, которая является функцией декартовых подвижных координат endpoint и зависит от ошибок отработки ИУ командных сигналов в системе с динамической обратной связью. Полагая элементы вектора $\Delta \vec{r}$ достаточно малыми, используем формулу дифференциала функции трех переменных $\Delta \vec{r} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \vec{r}}{\partial q_{1i}} \cdot e_{yi}$, где $e_{yi} = \max_{t \geq T} \{|e_{1i}(t)|\}$, $\bar{q}_{1i} = \max_{t \geq 0} \{|q_{1i}(t)|\}$, $i = \overline{1, 3}$, $\vec{r} = \text{col}(\bar{q}_{13} \cos \bar{q}_{11}, \bar{q}_{13} \sin \bar{q}_{11}, \bar{q}_{12})$ (1), и получим:

$$\Delta \vec{r} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{y3} \cos \bar{q}_{11} - e_{y1} \bar{q}_{13} \sin \bar{q}_{11} \\ e_{y3} \sin \bar{q}_{11} + e_{y1} \bar{q}_{13} \cos \bar{q}_{11} \\ e_{y2} \end{pmatrix}, \quad |\Delta \vec{r}| = \sqrt{e_{y3}^2 + e_{y1}^2 \bar{q}_{13}^2 + e_{y2}^2}. \quad (8)$$

Результаты моделирования показали, что в системе с динамическим наблюдателем смешанных переменных [3], по сравнению с системой с базовым законом управления (5), пограничный слой в скользящем режиме и ошибка стабилизации (7) увеличиваются примерно на два порядка, но кинематическая погрешность $|\Delta \vec{r}| \leq 1,3$ [мм] (8) удовлетворяет технологическим требованиям. Система с динамической обратной связью многофункциональна, не требует полного комплекта датчиков и сохраняет работоспособность при изменении внешних воздействий без переналадки параметров регулятора.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-01-00846А).

Список использованных источников

1. Вукобратович, М. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами / М. Вукобратович, Д. Стокич, Н. Кирчански. – М. : Мир, 1989. – 376 с.
2. Краснова, С. А. Блочный синтез систем управления роботами-манипуляторами в условиях неопределенности / С. А. Краснова, В. А. Уткин, А. В. Уткин. – М. : ЛЕНАНД, 2014. – 208 с.
3. Краснов, Д. В. Система управления электромеханическим объектом с наблюдателем состояния пониженного порядка / Д. В. Краснов // Управление большими системами : сб. тр. XV Всерос. школы-конференции молодых ученых. В 2-х т. – Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2018. – Т. 2. – С. 158 – 165.
4. Utkin, V. I. Sliding mode control in electromechanical systems / V. I. Utkin, J. Guldner, J. Shi. – New York : CRC Press, 2009. – 485 p.

К. Ю. Шутова¹, С. А. Браништов²

(¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия;

² Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
Москва, Россия)

МЕТОДЫ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИЛ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Аннотация. Исследуется движение мобильных роботов в скоплении. Представлено сравнение методов потенциальных и социальных сил. Методы реализованы в программе, разработаны сцены для движения роботов, проведены эксперименты с оценкой скорости прохождения участка и для разной интенсивности потока, исследованы различные варианты поведения (стратегии) роботов.

METHODS OF POTENTIAL AND SOCIAL FORCES OF THE MOBILE ROBOT MOVEMENT

Abstract. The article focuses on study of the movement of mobile robots in a cluttered environment. The methods of potential and social forces are studied and compared. Ones are implemented as a control algorithm for mobile robots. We perform an experiment on certain typical scenes with an estimation of average velocity while flow rate was various. We investigated various behaviors (strategy) of robots.

Введение. В данной работе исследовались два метода движения: социальный и потенциальный [1, 4, 5]. Целью работы является исследование движения мобильных роботов в скоплении, изучение данных способов движения, выявление достоинств и недостатков каждого из них.

Общие правила методов. Основные обозначения: i – рассматриваемый робот, x_i^0 – пункт назначения (место нахождения цели), T_i – предполагаемое время прибытия, t – текущее время на месте $x_i(t)$, $u_i^0(t)$ – идеальная скорость, $\vec{r}_i(t) = (x_i(t), y_i(t))$ – положение робота i , $\vec{r}^* = (x^*, y^*)$ – положение цели.

Модель социальных сил. Данная модель представляет собой суммирование всех сил, влияющих на движение робота. Движение к цели складывается из силы притяжения к цели, сил отталкивания от ближайших препятствий (роботов, стен) и сил отталкивания от виртуальных препятствий [5].

Предположим, что робот i массой m , движущийся со скоростью

$$v_i(t) := \frac{d\vec{x}_i(t)}{dt}, \quad (1)$$

применяет силу

$$\vec{f}_i(t) \equiv m_i \frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} := \gamma_i [\vec{v}_i^0 - \vec{v}_i(t)], \quad (2)$$

где величина $\gamma_i \vec{v}_i^0$ имеет значение мотивации для продвижения вперед со скоростью \vec{v}_i^0 .

Робот держится на некотором расстоянии от препятствий и других роботов, этот эффект можно описать векторами притяжения и отталкивания, заданными величинами \vec{f}_{ij}^α и \vec{f}_{ij}^r , известными как градиент приближения или удаления \vec{f}_{ij}^α и \vec{f}_{ij}^r , еще не являются силами, но они – меры направления мотивации i -го робота приблизиться или отдалиться от препятствия j . Данные силы уменьшаются с увеличением расстояния между i и j :

$$r_{ij} = \|\vec{x}_j - \vec{x}_i\|, \quad (3)$$

тогда как направление желаемого движения \vec{e}_{ij} будет нормализовано к или от j , т.е.

$$\vec{e}_i^* = \pm \frac{\vec{x}^* - \vec{x}_i}{\|\vec{x}^* - \vec{x}_i\|}, \quad (4)$$

где «+» – притягивающий (α – по направлению), а «-» – отталкивающий (r – против направления) случай. На скорость робота в методе социальных сил также влияет привлекательный эффект от роботов его типа: он может двигаться в составе группы роботов, пока сила притяжения к цели не превысит силу притяжения к другим объектам (притяжение к ним уменьшается со временем t). Таким образом, движение с группой попутчиков позволяет уменьшить число встречных препятствий.

Отклонение фактической скорости $v_i(t)$ от желаемой скорости $v_i^0(t)$ по причине обхода препятствий приводит к тому, что появляется необходимость (мотивация) изменить скорость в сторону предпочтительной. Этот процесс описан формулой для ускорения:

$$f_i^0(v_i) = \frac{1}{\tau_i} (v_i^0 \vec{e}_i^* - \vec{v}_i). \quad (5)$$

Эффект, при котором робот держится на расстоянии от препятствий, описывается формулой, выраженной в терминах потенциала V_{ij} :

$$f_{ij}(r_{ij}) = -\nabla_{r_{ij}} V_{ij} (\|b(r_{ij})\|).$$

Потенциал V_{ij} – монотонно убывающая функция от b с эквипотенциальными линиями, имеющими форму эллипса. Величина b обозначает малую полуось эллипса:

$$2b = \sqrt{(\|r_{ij}\| + \|r_{ij} - v_i \Delta t e_j\|)^2 - (v_j \Delta t)^2},$$

где $v_i \Delta t = s_i$ – величина шага робота i .

Тогда результирующая сила представима в виде

$$m_i \frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} = \vec{f}_i(t) := \vec{f}_{ij}(\vec{r}_{ij}(t)) - \gamma_i \vec{v}_i(t). \quad (6)$$

Если робот i подвержен нескольким мотивациям, то суммарный эффект будет суммой всех, что приведет к уравнению, обобщающему (2) и (6):

$$m_i \frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} = \vec{f}_i(t) := \left(\sum_i \vec{f}_{ij}(\vec{r}_{ij}(t)) + \gamma_i \vec{v}_i^0(t) \right) - \gamma_i \vec{v}_i(t). \quad (7)$$

Каждому роботу необходимо достигнуть своей цели при меньшем отклонении от курса к ней. При взаимной компенсации разнонаправленных мотива-

ций возможен локальный минимум поля мотиваций («тупик»). Для решения этой проблемы введены виртуальные препятствия справа (или только слева) от тупика, создающие дополнительный вектор отталкивания $\vec{f}_{virtual}$ [4]. Таким способом можно добиться того, что результирующий вектор скорости будет направлен в сторону выхода из тупика.

$$m_i \frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} = \left(\sum_i \vec{f}_{ij}(\vec{r}_{ij}(t)) + \vec{f}_{virtual} + \gamma_i \vec{v}_i^0(t) \right) - \gamma_i \vec{v}_i(t).$$

Каждый робот обладает «личным пространством» вокруг себя, в которое не допускается попадание прочих объектов. Выражается оно некоторым радиусом. Робот старается двигаться так, чтобы сохранить дистанцию до препятствий не менее этого радиуса. В методе социальных сил величина этого радиуса обратно пропорционально зависит от плотности расположения препятствий вблизи робота. И, кроме того, она прямо пропорционально зависит от скорости движения, позволяя обеспечить безопасный обход препятствия.

Так же метод социальных сил обладает свойством, при котором при большой собственной скорости робот обходит препятствия на большей дистанции. Это связано с тем, что роботу нужно пространство для совершения маневра. При большой скорости – радиус видимости препятствий больше.

Модель потенциальных сил. Построение пути робота в заданную точку может осуществляться за счет действующих на него потенциальных сил двух типов: силы притяжения к цели и сил отталкивания от препятствий [1] – [3]. Для создания поля этих сил искусственно формируются потенциалы, решается экстремальная задача без ограничений. Недостатком метода потенциальных сил является его громоздкость в случае многомерных пространств и сложность потенциальных сил: наличие локальных экстремумов.

Рассматривается область перед роботом i , заданная конусом с углом 180 градусов и некоторым радиусом, таким образом, задана область видимости. В радиусе видимости для каждого препятствия строится вектор отталкивания, направленный от препятствия к роботу и обратно пропорциональный по величине квадрату расстояния между ними:

$$\vec{r}_i = \sum_{k=0}^n m_k m_i \left(\frac{p_i}{d_k} - 1 \right)^2, \quad (8)$$

где n – число препятствий в области видимости; m_k, m_i – константы, которые задают степень влияния препятствий и роботов на других; p_i – радиус области видимости робота; d_k – дистанция от робота до препятствия.

Зададим вектор стремления к цели \vec{e}_i^* . При сложении векторов отталкивания от препятствий и вектора стремления к цели получим вектор скорости дви-

жения: $\vec{v}_i^* = \gamma_i \vec{e}_i^* + \vec{r}_i$, где коэффициент γ_i – мотивация, чтобы продвинуться вперед.

В этом методе, так же как и в методе социальных сил, возможен локальный минимум при компенсации сил, но еще и колебательный процесс. Здесь для решения этой проблемы применяется другой прием. Если в направлении движения находится препятствие (стена, другой робот, неподвижный объект), робот дополнительно выполняет маневр отклонения в сторону с меньшим количеством препятствий: $f_i = \sum_{k=0}^n (p_i - d_k)/(p_i - s_i)$, где для каждого сектора вокруг оценивается сумма близости препятствий. Здесь s_i – минимальная дистанция приближения. Поворот будет выполнен в направлении такого сектора, в котором сумма препятствий меньше:

$$\begin{cases} \text{вперед} & \text{при } f_i^f < f_i^r \text{ и } f_i^f < f_i^l; \\ \text{право} & \text{при } f_i^r < f_i^f \text{ и } f_i^r \leq f_i^l; \\ \text{влево} & \text{при } f_i^l < f_i^f \text{ и } f_i^l < f_i^r, \end{cases}$$

где f_i^r – количество препятствий в секторе справа; f_i^l – слева; f_i^f – впереди.

Скорость движения корректируется в зависимости от того, как близко препятствие по курсу движения: $\vec{v}_i = \vec{v}_i^* \cdot \frac{d_k - s_i}{p_i - s_i}$.

Моделирование на компьютере. Основными этапами моделирования являются: написание программы метода для одного робота; создание простейшей программы потенциальных и социальных сил с 2 – 7 роботами (рис. 1 и 2); создание сцен для движения роботов (коридор, перекресток); добавление препятствий в каждый из методов и возможности обгона. В модели социальных сил траектория движения вокруг точки столкновения для одного из роботов, который имеет наименьший приоритет, будет иметь меньший радиус обхода, что сокращает общее время прохождения пути (рис. 2). Модель потенциальных сил не учитывает расчета обхода по меньшему радиусу обхода препятствий (нахождение минимальной траектории).

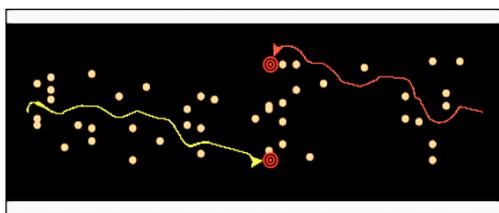


Рис. 1. Метод потенциальных сил

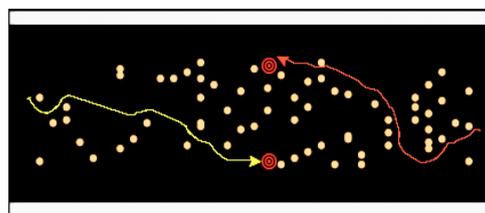


Рис. 2. Метод социальных сил

По рисункам, приведенным выше, видно: в методе социальных сил робот выбирает оптимальный путь без лишних обходов препятствий, может пройти достаточно близко от препятствия.

Далее после сравнения методов производим реализацию более интересных и интерактивных программ: создание сцен «перекресток», «узкий коридор», «уголок»; реализация для каждой из сцен рассматриваемых методов; сравнение полученных методов: создание графиков, подсчет количества столкновений, числа финишировавших роботов, агентов в действии; применение способов движения как в отдельности, так и вместе; создание для каждого способа движения коэффициента влияния, который уменьшает или увеличивает силу действия каждого способа движения.

Сравнение методов. К преимуществу метода социальных сил можно отнести использование понятия виртуального препятствия. Когда вектор скорости совпадает по направлению с вектором движения к цели и является близким к нулю, то робот попадает в локальный минимум, для выхода из него потребуются дополнительные силы. Например, когда на пути у робота встретятся два препятствия, которые создадут вектор отталкивания в противоположную сторону от вектора притяжения к цели, то робот не сможет сдвинуться с места. Дополнительные силы моделируются виртуальными препятствиями, они выводят робота из локального тупика, создают новый вектор влияния, и движение продолжается. Виртуальные препятствия представляют собой мнимых агентов в памяти робота, которые по свойствам соответствуют реальным препятствиям. Размещаются они таким образом относительно робота, чтобы создавать дополнительную силу к выходу из локального минимума.

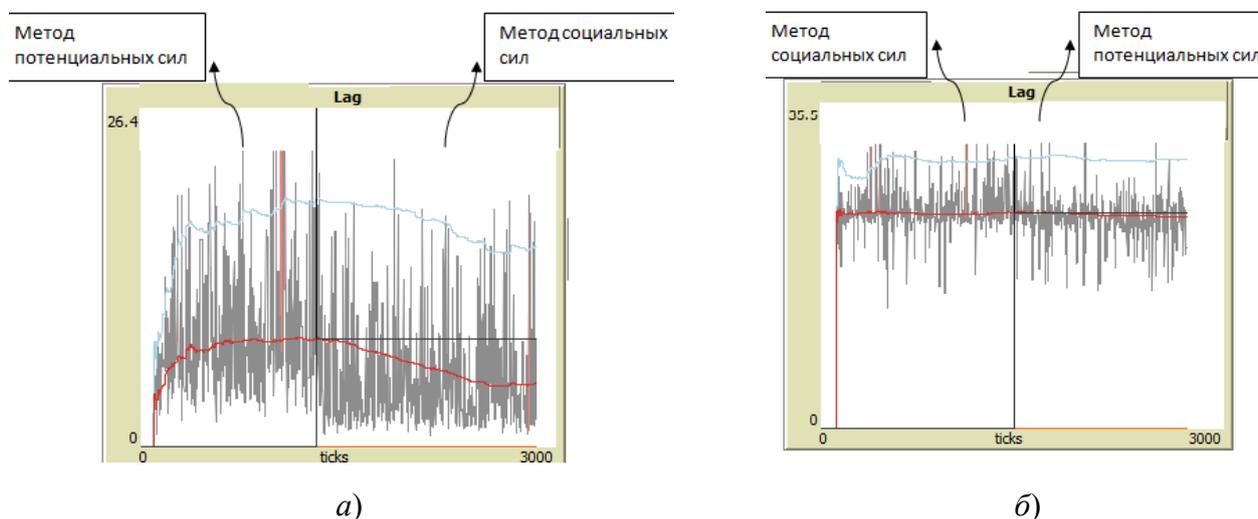


Рис. 3. Движение в коридоре (а) и движение в коридоре с правилом «обход пробки» (б)

При движении в сцене «коридор» метод социальных сил показывает лучшие результаты (рис. 3, а) [4]. Благодаря дополнительным силам отталкивания от виртуальных препятствий, влияющих на выход из локального минимума, роботы не задерживаются на пути к цели. Тогда их среднее значение замедле-

ния на всем участке пути ниже, чем в методе потенциальных сил. Роботы заранее просчитывают возможность столкновения и начинают перерасчет пути.

Но не во всех случаях эффективен метод социальных сил: при использовании правила «обход потенциальной пробки», в результате эксперимента выяснилось, что метод потенциальных сил эффективнее. На графике (рис. 3, б): результаты отличаются, но незначительно. Это связано с колебательными изменениями направления движения роботов, возникающих из-за нелинейных взаимодействий роботов.

Вывод. В данной работе рассмотрены модели движения роботов, были решены задачи: созданы методы социальных и потенциальных сил, проанализированы методы создания движения коллективов роботов. Написан ряд алгоритмов и сцен, которые дают базовое планирование действий каждого объекта и целой группы агентов, проведены исследования в каждой сцене с моделями движения.

Полученные графики показывают, что при использовании метода потенциальных сил при увеличении плотности потока роботов количество агентов увеличивается, что приводит к заторам. При использовании метода социальных сил, при том же увеличении плотности потока, количество роботов увеличивается, но незначительно. Роботы заранее просчитывают возможность столкновения и начинают перерасчет области личного пространства, пути, скорости, вводит виртуальные препятствия при нахождении в тупике. Модель потенциальных сил не учитывает перерасчет данных параметров. Модель социальных сил оказалась более эффективной, чем модель потенциальных сил.

Список использованных источников

1. Wang, Y. Two novel approaches for unmanned under water vehicle path planning: constrained optimization and semi-infinite constrained optimization / Y. Wang, D. N. Lane, G. S. Falconet // *Robotica*. – 2000. – V. 18. – P. 123 – 142.
2. Latombe, J. *Robot Motion Planning* / J. Latombe. – Kluwer, Boston, MA, 1991.
3. Kavraki, L. E. Probabilistic Roadmaps for Robot Path Planning, Robotics Laboratory, Department of Computer Science Stanford University / L. E. Kavraki, J. C. Latombe. – Stanford, California CA 94305, 1998. – 21 p.
4. Динамика управления роботами / В. В. Козлов, В. П. Макарычев, А. В. Тимофеев, Е. И. Юревич ; под ред. Е. И. Юревича. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 336 с.
5. Helbing, D. A. *Mathematical Model for the Behavior of Pedestrians* / D. A. Helbing. – Stuttgart, Germany, 1998.

Ю. В. Алферов, С. А. Мартиросов, А. В. Семенюк, А. А. Шнайдер
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ,
Тамбов, Россия)

РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСА СКАНЕРА ЧАСТОТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. В работе приводится интерфейс сканера частот для управления SDR-модулем с целью анализа радиоэлектронной обстановки оператором радиоразведки.

Yu. V. Alferov, S. A. Martirosov, A. V. Semenyuk, A. A. Shnayder
(The Multiservice Training Center and Radio Electronic Warfare Tactical Employment,
Tambov, Russia)

DEVELOPMENT OF A FREQUENCY SCANNER INTERFACE FOR MANAGING A ROBOTIC COMPLEX

Abstract. The paper provides the frequency scanner interface for controlling the SDR module for the purpose of analyzing the electronic environment by the radio intelligence operator.

Одной из основных задач робототехнических комплексов является разведка радиоэлектронной обстановки. Задачи мониторинга могут решаться с помощью технологии программно-определяемого радио. SDR-модуль удобно размещать на любом комплексе наземного, морского и воздушного базирования. Для оперативного управления подобными модулями необходима разработка «дружественного» интерфейса, который позволит оператору сократить время на анализ радиоэлектронной обстановки.

Software defined radio, SDR (программно-определяемая радиосистема) – радиотелекоммуникационная система, которая может быть настроена на произвольную полосу частот и принимать различные виды модулированного сигнала, состоящая из программируемого оборудования с программным управлением.

В SDR-оборудовании форма модулированного радиосигнала задается в ПО. Формируется цифровой сигнал, который затем с помощью широкополосного ЦАП преобразуется в аналоговый на промежуточной частоте (ПЧ). Далее сигнал ПЧ посредством преобразования вверх превращается в высокочастотный сигнал. В приемнике все происходит в обратном порядке. Широкополосный АЦП преобразует в цифровой вид множество узкополосных сигналов, попадающих во входной тракт приемника. В соответствии со встроенным ПО приемник извлекает, преобразует вниз и демодулирует сигналы каждого канала, т.е. технология SDR позволяет изменять эксплуатационные параметры радиооборудования на уровне ПО.

Основным преимуществом *SDR* является легкий апгрейд оборудования. Достаточно всего лишь обновить программное обеспечение, при этом аппаратные средства останутся без изменений. Так же *SDR* может быть легко адаптирована под любые функции различных приложений. Это стало возможно благодаря достижениям в области программного обеспечения и кремниевой технологии. Большинство ПО уже включает в себя все необходимые операции для выполнения оцифровки, частотной выборки, выделения необходимой полосы частот.

Трансивер, разработанный в концепции *SDR*, обеспечивает поддержку широкого спектра стандартов связи. Перепрограммирование трансивера для его адаптации под другой стандарт связи не влечет за собой изменения в аппаратной части. Отличительными чертами таких устройств являются:

- сверхширокополосная и малощумящая радиочастотная часть, обладающая большим динамическим диапазоном;
- высокоскоростной с большим динамическим диапазоном тракт аналого-цифрового преобразования;
- обладающий большой вычислительной мощностью сигнальный процессор и специализированный цифровой тракт фильтрации.

Для реализации интерфейса сканера частот необходимо выделить совокупность нескольких функциональных блоков, которые позволят оператору оперативно анализировать радиоэлектронную обстановку:

- блок отображения спектра в заданной полосе частот;
- блок отображения амплитудно-временной характеристики сигналов в заданной полосе частот («водопад»);
- блок управления параметрами радиосистемы и отображения осциллограммы;
- блок обработки принятых сигналов.

Интерфейс программного средства представлен на рис. 1.

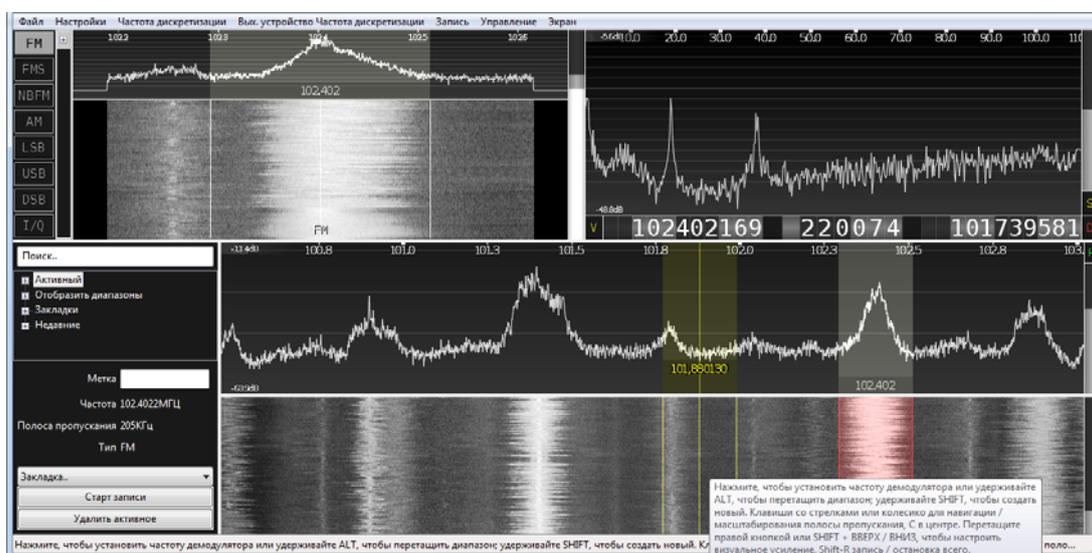


Рис. 1. Интерфейс программного средства

В блоке обработки принятых сигналов реализованы функции, позволяющие оператору сохранить найденный сигнал, присвоив ему определенное название, добавить его в группу подобных сигналов, отобразить последние найденные сигналы или удалить все рабочее пространство. Также существует возможность записи сигнала и сохранения его в аудиофайл для дальнейшего прослушивания. Присутствует возможность поиска сигнала среди сохраненных по его названию и частотам излучения. Блок обработки принятых сигналов приведен на рис. 2.

Блок отображения спектра в заданной полосе частот и блок отображения амплитудно-временной характеристики сигналов в заданной полосе частот позволяют оператору в режиме реального времени отслеживать изменение уровня мощности излучаемого на определенной частоте сигнала. Отображение «водопада» с помощью оттенков серого цвета показывает мощность излучаемого сигнала. Для изменения параметров графического отображения спектра и «водопада» реализованы ползунки, позволяющие изменить скорость их отображения. Также реализована возможность удержания пиков для определения максимальной мощности излучаемого сигнала.

Блок отображения спектра в заданной полосе частот и блок отображения амплитудно-временной характеристики сигналов в заданной полосе частот приведены на рис. 3.

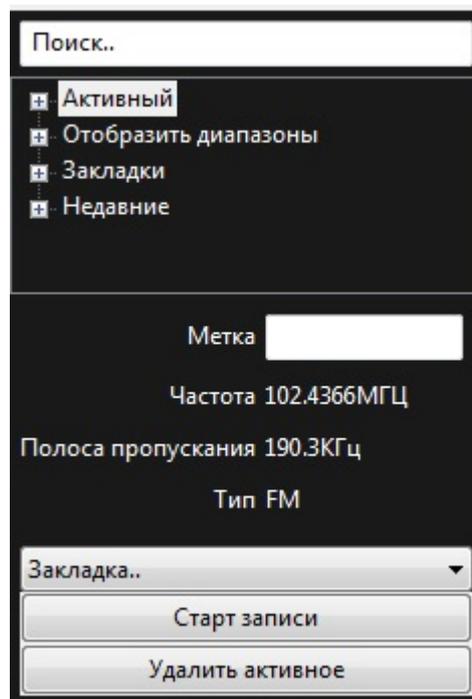


Рис. 2. Блок обработки принятых сигналов

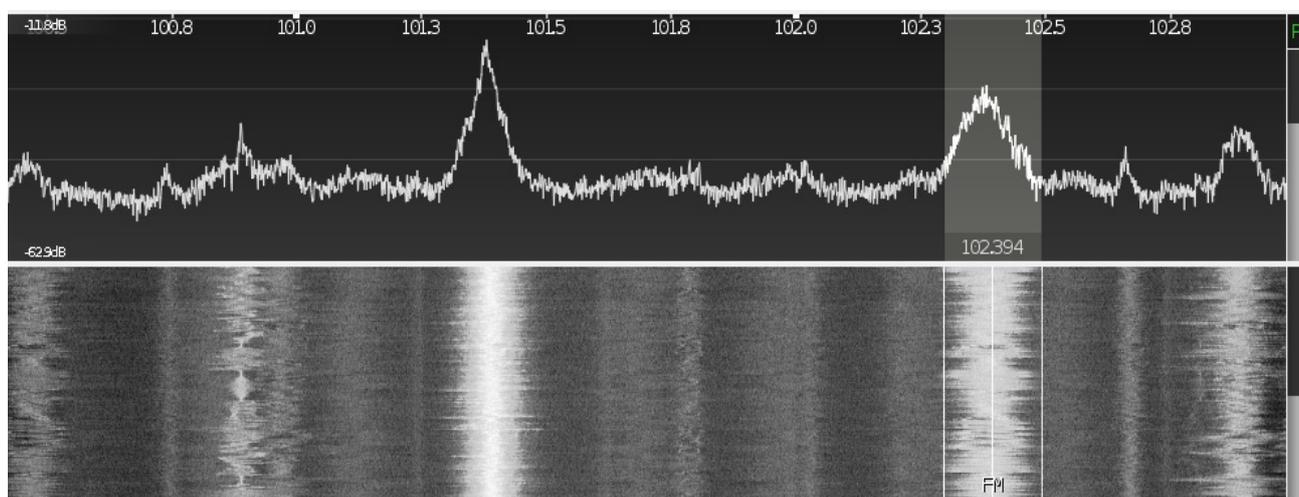


Рис. 3. Отображение спектра и «водопада»

Блок управления параметрами радиосистемы и отображения осциллограммы позволяет задавать частоту, на которой будет производиться прием сигнала, устанавливать полосу пропускания, установить центральную частоту, включить/отключить блокировку модема относительно центральной частоты. Кроме того, в блоке управления включается/отключается демодулятор, сольный режим. Так же ползунком регулируется уровень усиления демодулятора.

Блок управления параметрами радиосистемы и отображения осциллограммы представлен на рис. 4.

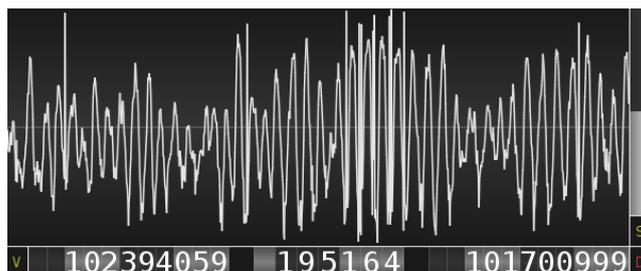


Рис. 4. Блок управления параметрами и отображения осциллограммы

Отдельным блоком реализовано отображение спектра и амплитудно-временной характеристики сигнала в заданной полосе пропускания. Данный блок представлен на рис. 5. Так же существует возможность задать определенный уровень мощности принимаемого сигнала.

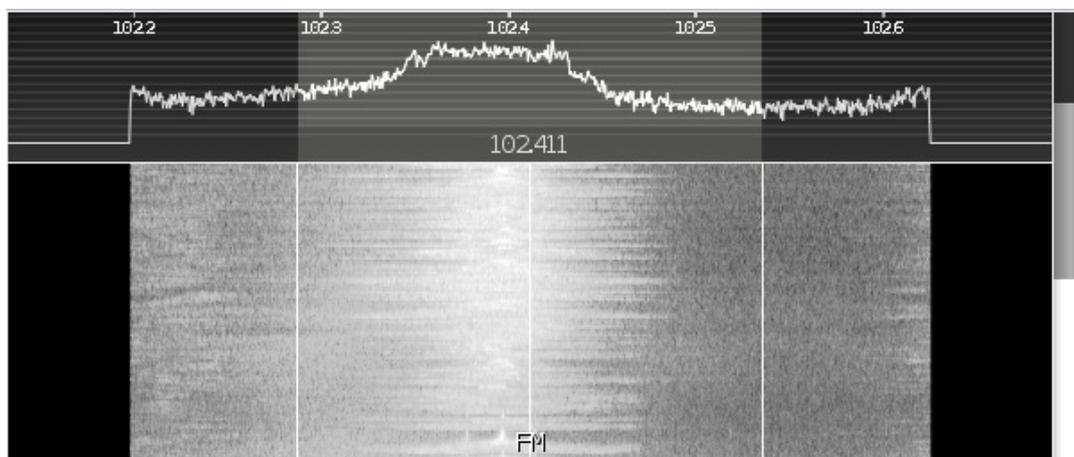


Рис. 5. Спектр и «водопад» в установленной полосе пропускания

Блок выбора типа модуляции позволяет оператору устанавливать тип модуляции принимаемого сигнала. В настоящее время отсутствуют либо недостаточно развиты алгоритмы распознавания видов модуляции аналогового и цифрового сигналов, поэтому необходимо предоставить оператору выбор из существующих алгоритмов для принятия верного решения относительно принимаемого сигнала. Данный блок представлен на рис. 6.

Разработанный интерфейс для сканера частот позволяет пользователю в режиме реального времени управлять SDR-модулем и отслеживать радиоэлектронную обстановку и оперативно реагировать на ее изменение, обеспечивает возможность хранения и оперативного поиска сигналов как на определенном наборе частот, так и в рамках выбранного поддиапазона, позволяет осуществить визуальное отображение спектра и амплитудно-временной характеристики найденного сигнала.



Рис. 6. Виды модуляции сигналов

Список использованных источников

- 1 Шахнович, И. Российский цифровой приемник 1288ХК1Т – первый представитель серии Мультиплекс / И. Шахнович // Электроника. – 2006. – № 2. – С. 24 – 31.
- 2 Пронин, К. Проектирование, оптимизация и моделирование SDR / К. Пронин // Электронные компоненты. – 2012. – № 2. – С. 49 – 53.
- 3 Фалько, А. И. Расчет преселекторов : учебное пособие / А. И. Фалько. – Новосибирск : СибГУТИ, 2002. – 145 с.
- 4 Гасанов, О. Принципы построения радиоприемников с цифровой обработкой сигнала / О. Гасанов // Электронные компоненты. – 2010. – № 12. – С. 63 – 65.
- 5 Чалил, М. Реализация цифрового радио / М. Чалил // Электронные компоненты. – 2013. – № 5. – С. 37 – 41.

П. М. Харланова

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СТРАТЕГИИ СТАЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ В ОГРАНИЧЕННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

Аннотация. В статье исследуется вопрос эффективности и применимости стайного поведения в ограниченных пространствах для моделирования перемещения мобильных роботов в помещениях. Эффективность оценена с помощью экспериментов на имитационных моделях.

P. M. Kharlanova

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia)

RESEARCH OF THE APPLICATION OF THE STRATEGY OF FLOCKING BEHAVIOR IN RESTRICTED SPACES

Abstract. The article examines the question of the effectiveness and applicability of flocking behavior in restricted spaces to simulate the movement of mobile robots in buildings. Efficiency is assessed using experiments on simulation models.

Введение. Исследованием стайного поведения в робототехнике занимается большое количество ученых по всему миру. Крейг Рейнольдс [1, 3] в 1987 году сформулировал основные принципы стайного поведения, и до сих пор современные ученые, основываясь на его теориях и разрабатывая свои, занимаются этим вопросом [2, 4]. Данная задача интересует исследователей неспроста, ведь благодаря стайному поведению, можно ускорить время достижения роботами своих целей.

Однако нас интересует вопрос исследования не просто стайного поведения, а полезности его применения именно в помещениях, на ограниченных участках для того, чтобы более продуктивно использовать пространство и иметь возможность образовывать временные группы для коллективного обхода препятствий и других групп, что требует меньших затрат, чем индивидуальный обход.

Таким образом, в данной статье была поставлена задача: выяснить, в каких ситуациях, возникающих в ограниченных пространствах, будет эффективно стайное поведение, а в каких его применение нецелесообразно.

Стайное поведение для нашей задачи – это способ образования временных групп участников движения, движущихся попутно. В стае достигается более плотное расположение агентов, в результате этого группа занимает меньший объем пространства. Группа по своей форме может быть вытянута вдоль траектории движения или иметь неправильную форму, но члены группы могут вступать в нее или выходить в любой момент, в зависимости от степени совпадения направления движения группы и собственной цели члена группы.

Для реализации стайного поведения применены три основных принципа движения в стае [1]: объединение, выравнивание направления движения и скорости, отделение.

В использованной модели стратегия реализована следующим образом: агент выбирает в своей окрестности всех соседей, обнаруживает ближайшего соседа и, если расстояние до него не меньше допустимого, то направляется к центру масс группы соседей – так происходит объединение с группой. В обратном случае, агент отклоняется от ближайшего соседа. Затем агент выравнивает направление движения и скорость со средним направлением всех членов группы.

Эффект от использования стайного поведения в различных ситуациях проявляется по-разному. В однонаправленном потоке без препятствий движение в стае приводит к большому замедлению из-за дополнительных маневров по объединению и выравниванию, а также из-за зависимости от скорости группы: в стае максимальная скорость вынуждено ограничивается остальными участниками.

Из графиков видно, что в ситуациях, где взаимодействуют встречные потоки, например в сцене «Коридор», эта стратегия показывает преимущество перед базовым (свободным) поведением, особенно при повышенной плотности

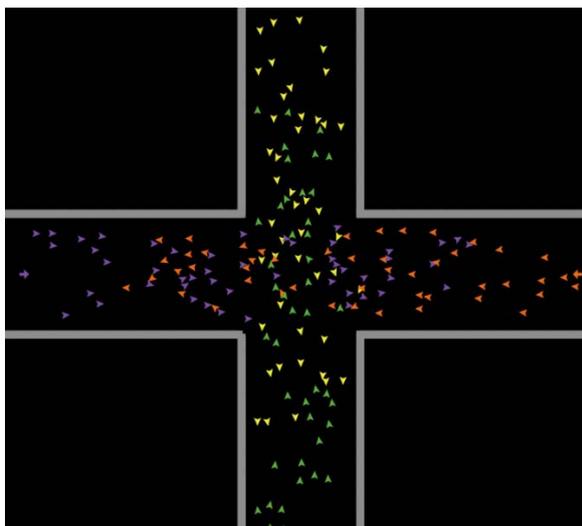


Рис. 1. Сцена «Перекресток» – самостоятельное движение

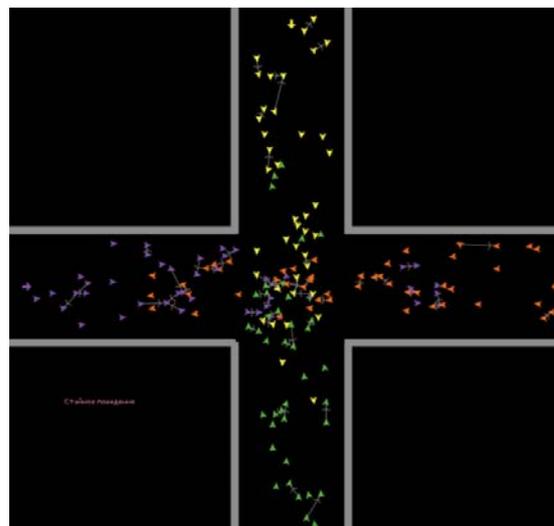


Рис. 2. Сцена «Перекресток» – стайное поведение

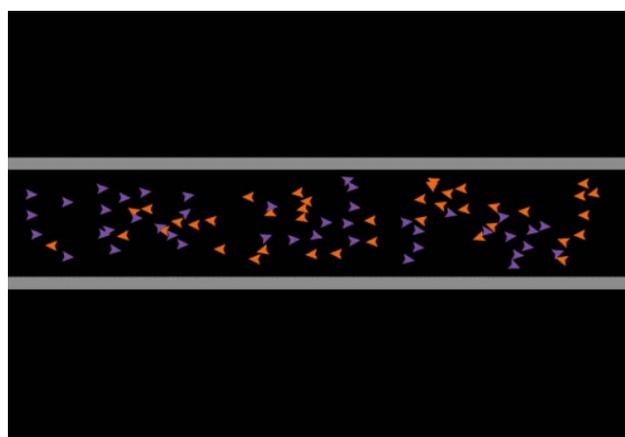


Рис. 3. Сцена «Коридор» – самостоятельное движение

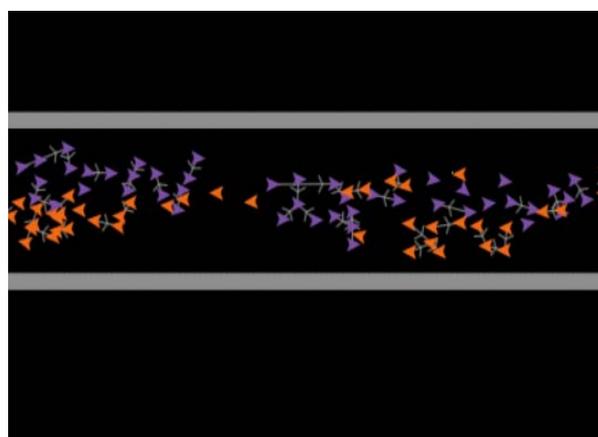


Рис. 4. Сцена «Коридор» – стайное поведение

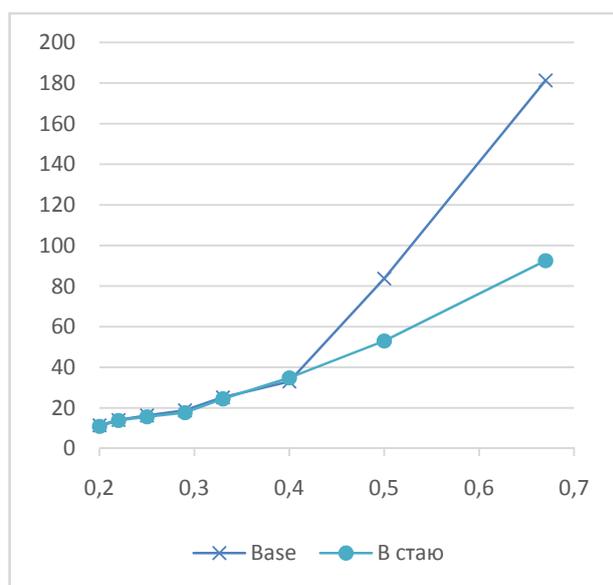


Рис. 5. Сцена «Коридор». График абсолютной задержки в процентах

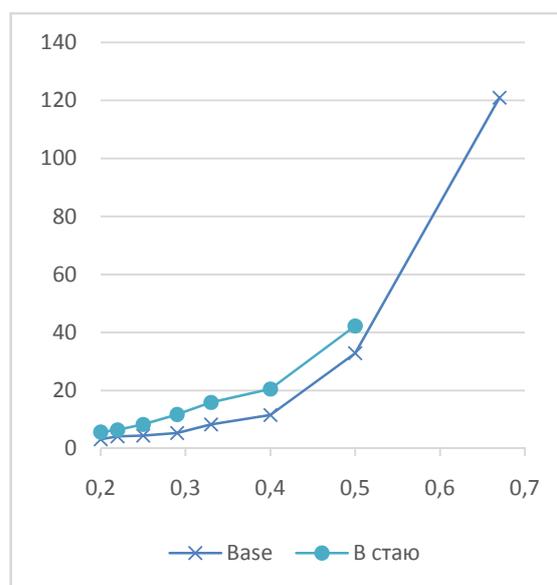


Рис. 4. Сцена «Перекресток». График абсолютной задержки в процентах

агентов на сцене, так как благодаря стайному поведению достигается более плотное расположение агентов в группах, а это экономит пространство и ускоряет время прохождения сцены. В ситуации пересекающихся потоков на перекрестке стайное поведение неэффективно применять, поскольку в центре перекрестка очень высокая плотность агентов, а из-за стайного поведения она еще сильнее увеличивается.

Вывод. Принципы стайного поведения формируют небольшие локальные уплотненные группы, это позволяет эффективнее использовать пространство.

Организуя движение на участке, можно обеспечивать ламинарность потока с помощью стратегий стайного поведения, что уменьшает число встречных взаимодействий и повышает общую скорость потока.

Список использованных источников

1. Craig, W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model / W. Reynolds Craig // Computer Graphics. – V. 21, № 4. – July 1987.
2. Ferdinandya, B. Collective motion of groups of self-propelled particles following interacting leaders / B. Ferdinandya, K. Ozogány, T. Vicseka. – Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 479. – 2017. – P. 467 – 477.
3. Reynolds, C. W. Steering behaviors for autonomous characters / C. W. Reynolds // In: Game Developers Conference. – 1999.
4. Benjamin, T., Fine Dylan Shell A. Unifying microscopic flocking motion models for virtual, robotic, and biological flock members / Benjamin T., Fine Dylan A. Shell // AutonRobot. – 2013. – 35. – P. 195 – 219.

С. И. Литун

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

УТОЧНЕНИЕ ИНДЕКСА ГЕОМАГНИТНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ ПО ТРАЕКТОРНЫМ ДАННЫМ ТЕСТОВОГО СПУТНИКА «СФЕРА»

Аннотация. Работа посвящена серьезной задаче механики космического полета – анализу возмущений орбиты искусственного спутника Земли (ИСЗ), осуществляющего полет в верхних слоях атмосферы.

S. I. Litun

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia)

REFINEMENT OF THE GEOMAGNETIC DISTURBANCE INDEX BASED ON THE TRAJECTORY DATA OF THE SFERA TEST SATELLITE

Abstract. The paper is devoted to serious problems of the mechanics of space flight – the analysis of the perturbations of the orbit of an artificial Earth satellite (AES) flying in the upper atmosphere.

Введение. Для спутников Земли очень важно исследовать закономерности изменения орбиты под влиянием атмосферы Земли и нецентральности земного гравитационного поля [1].

В работе представлена методика обработки результатов космического эксперимента «Вектор-Т». В ходе этого эксперимента космонавтом МКС был отправлен в полет искусственный спутник Земли «Сфера». ИСЗ имел форму небольшой правильной сферы с точно известными диаметром $d = 53$ см и массой $m = 13$ кг. Эксперимент с ИСЗ «Сфера» решал задачи проверки адекватности и калибровки математических моделей и алгоритмов, используемых при расчете плотности атмосферы в задачах определения и прогноза движения космических аппаратов (КА) на низких околоземных орбитах [1]. В рамках представленной методики, измерения параметров орбиты КА «Сфера» были аппроксимированы решениями достаточно точных уравнений его движения, что позволило уточнить индекс геомагнитной возмущенности и убедиться в адекватности модели аэродинамического сопротивления.

Стоит отметить, что полученные поправки могут применяться для исследования траектории движения спутников, имеющих пересечения во времени существования со Сферой. Кроме того, орбиты спутников должны быть близки [2].

Уравнения движения низколетящего КА. Уравнение возмущенного движения ИСЗ вокруг притягивающего тела в самом общем виде записывается следующим образом:

$$\frac{d^2}{dt^2} \vec{r} = -\frac{\mu_E}{r^3} \vec{r} + \vec{\Psi}, \quad (1)$$

где $\vec{\Psi}$ – суммарное ускорение, получаемое спутником в результате действия всех возмущающих факторов и называемое возмущающим ускорением; \vec{r} – радиус-вектор центра масс ИСЗ в геоцентрической инерциальной системе координат; r – его модуль.

Известно, что основными возмущениями, действующими на низкоорбитальные ИСЗ, являются нецентральность земной гравитации и аэродинамическое сопротивление. Другие возмущающие факторы, такие как притяжение небесных тел, световое давление и т.д., слабо влияют на движение низкоорбитальных спутников.

При обработке данных использовались уравнения движения, записанные в гринвичской системе координат:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_1, \\ \dot{x}_2 = v_2, \\ \dot{x}_3 = v_3, \\ \dot{v}_1 = -\left(\frac{\mu}{|r|^3} + \omega_E^2\right) x_1 + 2\omega_E \dot{x}_2 + g_1 + f_1, \\ \dot{v}_2 = -\left(\frac{\mu}{|r|^3} + \omega_E^2\right) x_2 - 2\omega_E \dot{x}_1 + g_2 + f_2, \\ \dot{v}_3 = -\left(\frac{\mu}{|r|^3} + \omega_E^2\right) x_3 + g_3 + f_3. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{g} = (g_1, g_2, g_3)$ и $\mathbf{f} = (f_1, f_2, f_3)$ – возмущающие ускорения, обусловленные нецентральностью земной гравитации и аэродинамическим сопротивлением.

Интегрирование системы уравнений движения центра масс космического аппарата осуществлялось с помощью метода Рунге–Кутты. В качестве начальных данных использовались результаты наблюдений, полученные с использованием открытой американской модели SGP4 [3]. Эти данные представляли собой ряды $\mathbf{R}^{(n)} = (R_1^{(n)}, R_2^{(n)}, R_3^{(n)})$, $\mathbf{V}^{(n)} = (V_1^{(n)}, V_2^{(n)}, V_3^{(n)})$ на равномерной временной сетке $\{t_n\}$ с шагом, равным 1 минуте, и были сгруппированы в наборы из $N = 1440$ наблюдений, соответствующих одним суткам. Данные наблюдений охватывали 90 дней полета, что соответствует времени существования спутника «Сфера». Расчетные значения объединим в векторы $\mathbf{r} = (x_1, x_2, x_3)$, $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)$, где x_1, x_2, x_3 – гринвичские координаты спутника, v_1, v_2, v_3 – компоненты вектора скорости [2].

В работе нецентральность поля учитывалась с точностью до членов порядка (16,16) включительно в разложении гравитационного потенциала Земли в ряд по шаровым функциям. Для численного моделирования применялась стандартная модель EGM2008.

Для определения силы аэродинамического сопротивления принимались следующие допущения: атмосфера вращается вместе с Землей; ее плотность ρ_a рассчитывается с помощью модели ГОСТ Р 25645.166–2004 [4]; частицы набегающего атмосферного потока осуществляют взаимодействие с поверхностью КА посредством абсолютно неупругого удара:

$$\vec{F}_a = -\rho_a c_b |\mathbf{v}| \vec{v}, \quad (3)$$

$$c_b = \frac{s_0}{m}, \quad (4)$$

c_b – баллистический коэффициент, $[c_b] = \text{м}^2/\text{кг}$; s_0 – проекция КА на плоскость, перпендикулярную направлению движения, $[s_0] = \text{м}^2$. Возмущающее ускорение, обусловленное аэродинамическим сопротивлением, вычисляется согласно формуле

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}_a}{m}. \quad (5)$$

Для расчетов повышенной точности ГОСТ Р 25645.166–2004 рекомендует уточнять индекс геомагнитной возмущенности K_p , входящий в формулу для вычисления плотности атмосферы в целях согласования плотности, рассчитанной согласно модели ГОСТ, и ее фактическим значением. Считается, что данный параметр является наиболее неточным и изменчивым по сравнению с дру-

гими параметрами. Кроме того, стандарт также рекомендует уточнять баллистический коэффициент c_b по результатам наблюдений за движением ИСЗ.

Уточнение баллистического коэффициента по результатам обработки траекторных данных Сферы. Для уточнения баллистического коэффициента КА сферической формы с данными наблюдений вдоль решения системы уравнений орбитального движения ИСЗ в течение суток вычислялся функционал

$$\Phi(\mathbf{z}) = \sum_{n=0}^N \sum_{j=1}^3 \left[\left(R_j^{(n)} - r_j(t_n, \mathbf{z}) \right)^2 + \tau^2 \left(V_j^{(n)} - v_j(t_n, \mathbf{z}) \right)^2 \right], \quad (6)$$

где $\mathbf{z} = (\boldsymbol{\gamma}, c_b)$, $\boldsymbol{\gamma} = (x_1(t_0), x_2(t_0), x_3(t_0), v_1(t_0), v_2(t_0), v_3(t_0))$ – вектор параметров, состоящий из начальных условий и баллистического коэффициента; $r_j(t_n)$, $v_j(t_n)$ – компоненты вектора координат и вектора скорости соответственно в заданный момент времени t , $\tau = 10^3$ с – весовой коэффициент. Минимизация Φ по \mathbf{z} выполнялась последовательно методами Левенберга–Марквардта и Гаусса–Ньютона [5]. Начальное приближение параметра c_b было получено по формуле (4), значение индекса геомагнитной возмущенности определялось в каждый момент времени t с помощью линейной интерполяции по известным значениям трехчасовых индексов k_p , взятых из интернет-источника celestrak.com.

Данные были обработаны для 90 дней, охватывающих практически весь полет. Для рассматриваемых дней значение c_b менялось изо дня в день, тогда как в действительности оно должно быть неизменным. Указанный эффект обусловлен неточным заданием параметров атмосферы, и в первую очередь индекса геомагнитной активности K_p .

При анализе графических представлений (гистограммы распределения и эмпирической функции распределения) полученных результатов было выдвинуто предположение о нормальности распределения. Данное предположение подтвердил критерий Колмогорова–Смирнова с уровнем доверия 95%. Уточненной оценкой баллистического коэффициента считалась выборочная медиана $c_b = 0,02654$ м²/кг.

Уточнение индекса геомагнитной возмущенности по результатам обработки траекторных данных Сферы. На данном этапе баллистический коэффициент c_b , входящий в модель аэродинамического сопротивления (3), считался постоянным и равным выборочной медиане, а индекс K_p предлагалось уточнять вместе с начальными условиями. В качестве начального приближения K_p выбиралось среднее значение индекса геомагнитной возмущенности за сутки, вычисленное по формуле левых прямоугольников.

Согласно методу наименьших квадратов уточненными значениями вектора параметров $\gamma = (x_1(t_0), x_2(t_0), x_3(t_0), v_1(t_0), v_2(t_0), v_3(t_0), K_p)$ будем считать те значения, которые доставляют минимум функционалу (6). Минимизация осуществлялась последовательно методами Левенберга–Маркварда и Гаусса–Ньютона [5].

При анализе результатов критериями точности уточнений служили средние квадратические отклонения аппроксимации и средние квадратические отклонения по параметрам. Ковариационная матрица оценок определялась по формуле

$$K = \sigma^2 H^{-1}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\Phi_{\min}}{6N-1}}. \quad (8)$$

Выявлено, что решения системы дифференциальных уравнений с уточненными параметрами лучше аппроксимируют данные наблюдений, чем решения без уточнения параметров. На рисунке 1 изображен модуль разности абсолютных значений радиусов-векторов за сутки, синий график соответствует разности данных наблюдений и решений системы до уточнения параметров, красный график – после уточнения параметров.

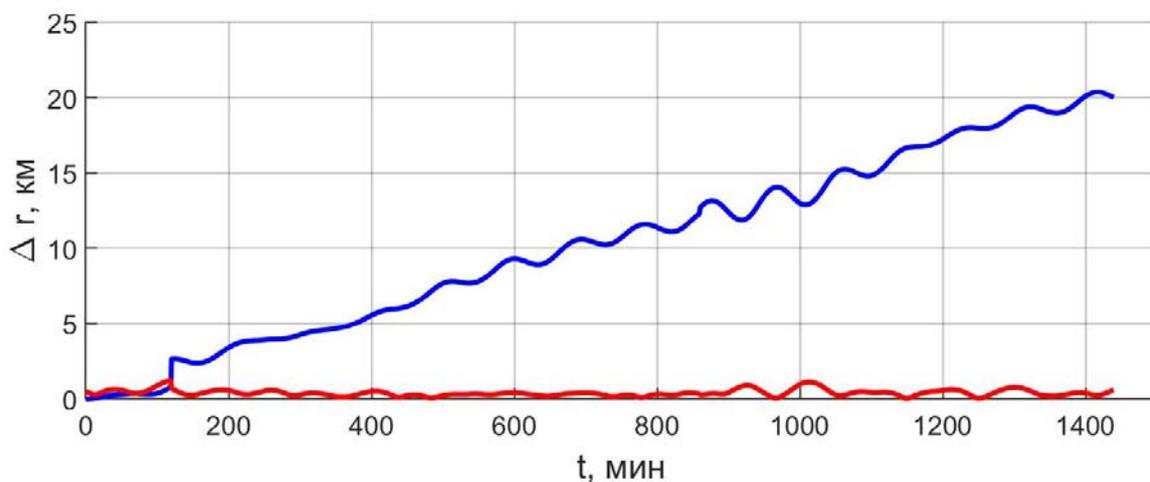


Рис. 1. Модуль разности абсолютных значений радиусов-векторов за сутки. Момент времени $t = 0$ соответствует 22.08.2012 00.00.00 UTC

Заключение. Представленная методика позволяет уточнить параметры атмосферы с использованием тестового спутника сферической формы. Показано, что уточненная динамическая модель движения аппроксимирует данные наблюдений с хорошей точностью, погрешность порядка 10^{-1} км. Полученные поправки индекса геомагнитной возмущенности могут быть использованы к спутникам более сложной формы для анализа их орбитального движения.

Список использованных источников

1. Уточнение индекса геомагнитной возмущенности по измерениям орбиты тестового спутника / С. Н. Алямовский и др. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2018. – № 41. – 43 с.
2. Сферические спутники – от начала космической эры до современных экспериментов / С. Н. Алямовский и др. // Космическая техника и технологии. – 2017. – № 4(19). – С. 5 – 14.
3. Project Space Track. <https://www.space-track.org/>
4. ГОСТ Р 25645.166–2004. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2004.
5. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М. : Мир, 1985. – 509 с.

К. С. Блинов, А. С. Егоров

(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия)

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ СОРТИРОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА

Аннотация. В статье описана система сортировки на базе коллаборативного робота UR3. Разработан алгоритм управления системой сортировки. Создано программное обеспечение для осуществления процесса сортировки в разработанной системе.

K. S. Blinov, A. S. Egorov

(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

SORTING SYSTEM CONTROL USING A COLLABORATIVE ROBOT

Abstract. The article describes a sorting system based on the collaborative robot UR3. An algorithm for controlling the sorting system has been developed. A software for the sorting process in the developed system has been created.

В современном мире широко распространено использование обработки изображений для решения различных задач автоматического контроля, управления и измерения.

Одним из применений систем технического зрения является их применение совместно с промышленными роботами и другими системами автоматизации. Машинное зрение включает в себя анализ визуальной информации для дальнейшего принятия решений. Самый простой пример использования технологии: проверка состояния продукта на конвейерной ленте или перед отправкой посылки по почте.

Исторически алгоритмы машинного зрения внедрялись в небольшом количестве в производство, так как это было очень затратно. Однако стоимость, производительность и потребление энергии в электронных системах, которые были достигнуты сегодня, проложили путь для широкого распространения машинного зрения в различных отраслях. В данной работе технология машинного зрения была внедрена в систему сортировки на основе коллаборативного робота-манипулятора UR3.

Задача сортировки похожа на задачу распознавания образов и заключается в измерении координат и ориентации объектов, а также в определении свойств этих объектов, являющихся критерием сортировки. Объекты, которые имеют относительно простую форму, в данном исследовании для простоты – прямоугольную, однозначно характеризуются контуром регистрируемого изображения. Для решения задач оценки параметров и распознавания, характеризующих ориентацию и координаты таких объектов, используют алгоритмы, основанные на анализе контуров изображений.

Цель работы заключалась в разработке системы управления коллаборативным роботом UR3 с применением технического зрения для использования робота в технологических процессах сортировки и перемещения объектов, имеющих произвольное положение на рабочей плоскости.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Произвести анализ существующих решений систем управления промышленными роботами.
2. Разработать систему технического зрения для определения параметров объектов сортировки.
3. Выполнить калибровку камеры и решить задачу исключения дисторсии.
4. Разработать подпрограмму системы технического зрения для нахождения центра и угла отклонения анализируемого объекта.
5. Разработать подпрограмму позиционирования схвата манипулятора в полученные координаты.

В данном исследовании выбрана простая система, позволяющая определять декартовы координаты x и y , а также угол ориентации R полезных грузов, находящихся в одной плоскости рабочего пространства манипуляционного робота, так как параметры этой плоскости заранее известны. Более сложные решения позволяют определить три координаты x , y и z в рабочем пространстве. Комплексные решения позволяют определить все шесть координат x , y , z , φ , θ , ψ . Но более сложные решения требуют особых условий функционирования, поэтому их область применения сильно ограничена; кроме того, во многих технологических процессах отсутствует необходимость определения полного набора координат полезных грузов, поэтому стоимость и используемый функцио-

нал для таких систем будут неоправданными. В данной работе использовалась одна камера Basler серии «Ace» с интерфейсом USB3Vision. Данной камеры достаточно для получения данных о рабочем пространстве большой площади. В случае изменения технологического процесса возможна установка другой камеры, в том числе другого диапазона, без необходимости вмешиваться в конструкцию системы или электрическую схему.

Базовым методом работы системы технического зрения разработанной системы сортировки является контурный анализ. Алгоритм работы системы технического зрения приведен на рис. 1.

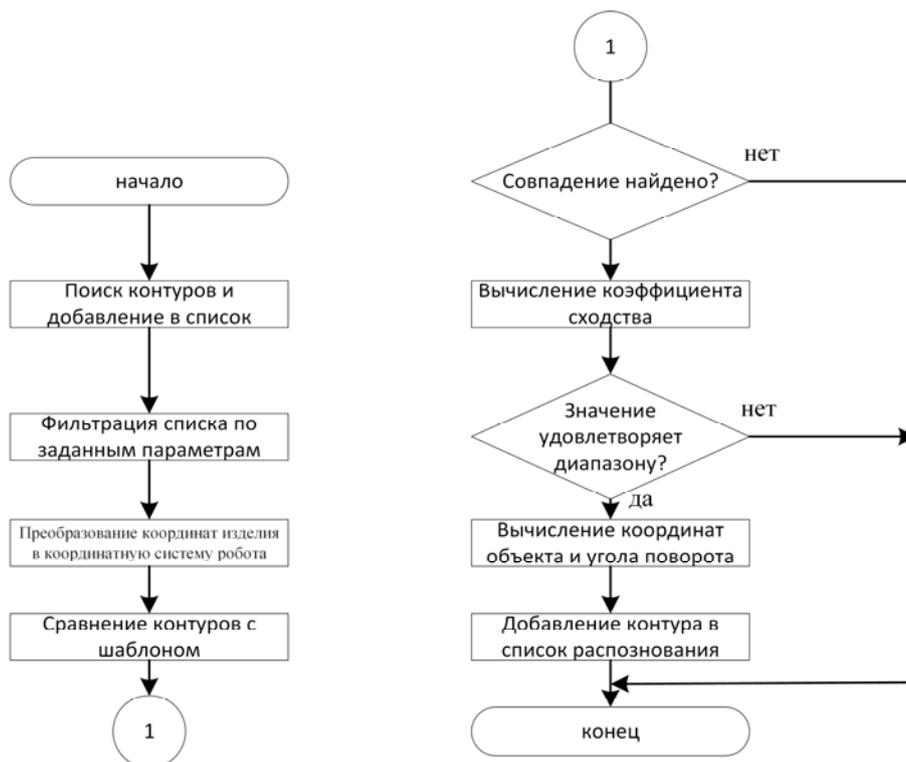


Рис. 1. Алгоритм работы системы технического зрения

В качестве языка программирования для реализации представленного алгоритма был выбран Python 3.7. Для проведения контурного анализа была использована библиотека OpenCV, которая реализует удобные методы для детектирования и манипуляции с контурами изображения. Для поиска контуров на двоичном изображении использовалась функция `findContours()`. Данная функция может находить внешние и вложенные контуры и определять их иерархию вложения. Отображение найденных контуров осуществлялось с помощью функции `drawContours()`. Были использованы дополнительные функции: `boundingRect` – возвращает прямоугольник, которым можно обвести контур. Функция возвращает прямоугольник, у которого стороны строго вертикальны и горизонтальны; `minAreaRect2()`, которая возвращает минимально возможный прямоугольник, которым можно обвести контур, который может быть повернут относительно системы координат изображения на определенный угол.

Для определения центра изделия с камеры был разработан алгоритм работы программы. Суть заключается в следующем:

– Объект сортировки движется по конвейеру и при попадании в кадр камеры, благодаря вычитанию белого фона находится его контур. Как только центр изделия попадает в центр кадра, конвейер останавливается и определяется цвет, преобладающий в полученном контуре.

– Производится работа с изображением. Так как цвет изделия определен, то применяется конкретная маска цвета для определения контура кубика и нахождения его центра.

В результате работы системы технического зрения создается список, элементами которого являются центры найденных объектов и углы их поворота относительно системы координат. На основе данного списка автоматически формируется программа на языке URScript для коллаборативного робота. Данная программа передается с управляющего компьютера системы контроллеру робота по локальной компьютерной сети. Структурная схема разработанной системы представлена на рис. 2.

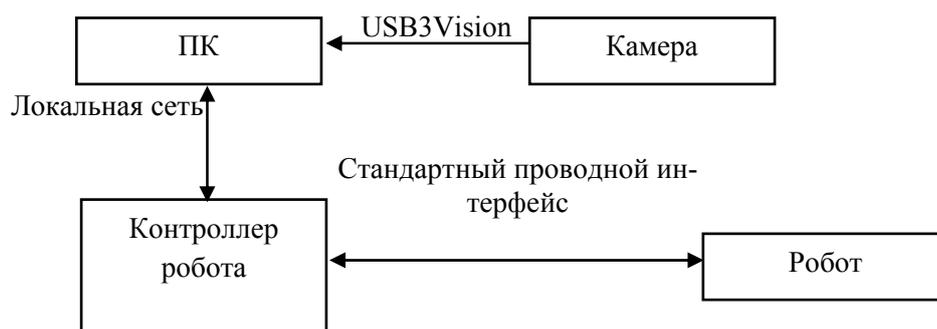


Рис. 2. Структурная схема системы

Преимуществом разработанной системы сортировки является универсальность. Ее можно интегрировать в абсолютно любое производство. Среди примеров применения системы:

- сортировка мусора на мусороперерабатывающих заводах;
- сортировка плодов и овощей на сельскохозяйственных производствах;
- сортировка выточенных на станках деталей.

В дальнейшей работе планируется модернизировать систему технического зрения, оснастив ее гиперспектральной камерой. Данная камера позволит применить систему для сортировки фруктов и овощей, позволяя находить скрытые подповерхностные дефекты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание. Проект 8.13393.2019/13.1 «Роботизированная система мониторинга и диагностики фитозаболеваний плодовоовощных культур»).

П. О. Владыкина
(МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ МУЛЬТИКОПТЕРА В РЕЖИМАХ ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ

Аннотация. В данной работе разрабатывается математическая модель системы регулятор–бесколлекторный двигатель, а также математическая модель регулятора скорости вращения двигателя. Производится настройка программных библиотек для обмена информацией между ЭВМ, контроллером Pixhawk 4 и бесколлекторным двигателем и дальнейшее тестирование.

P. O. Vladykina
(BMSTU, Moscow, Russia)

INVESTIGATION OF MULTI-COPTER ENGINES IN TAKEOFF AND LANDING MODES

Abstract. In this paper, we develop a mathematical model of the regulator – brushless motor system, as well as a mathematical model of the engine speed controller. Software libraries are configured for the exchange of information between computers, the Pixhawk 4 controller and the brushless motor, and further testing is carried out.

Введение. Целью данной работы была разработатка математической модели системы регулятор–бесколлекторный двигатель, а также математическая модель регулятора скорости вращения двигателя квадрокоптера, произведение настройки программных библиотек для обмена информацией между ЭВМ тактического уровня и контроллером Pixhawk 4. После всего протестировать возможность управления реальным образцом бесколлекторного двигателя посредством контроллера Pixhawk 4.

Pixhawk 4. Pixhawk является высокопроизводительным автопилотом в одном модуле, подходит для установки на любой носитель. Автопилот позиционируется как высший класс любительских, исследовательских и отраслевых потребностей и является модулем «все в одном». На рисунке 1 приведена модель Pixhawk 4.

Бесколлекторные двигатели. Вентильный электродвигатель (ВД) – это разновидность электродвигателя постоянного тока, у которого щеточно-коллекторный узел (ЩКУ) заменен полупроводниковым коммутатором, управляемым датчиком положения ротора.



**Рис. 1. Внешний вид
полетного контроллера
Pixhawk 4**

Конструктивно современные вентильные приводы состоят из электро-механической части (синхронной машины и датчика положения ротора) и из управляющей части (микроконтроллера и силового моста).

Синхронная машина, используемая в ВД, состоит из шихтованного (собранного из отдельных электрически изолированных листов электротехнической стали – для снижения вихревых токов) статора, в котором расположена много-фазная (обычно двух- или трехфазная) обмотка, и ротора (обычно на постоянных магнитах). В качестве датчиков положения ротора в БДПТ применяются датчики Холла, а в ВД – вращающиеся трансформаторы и накапливающие датчики. В так называемых «бездатчиковых» системах информация о положении определяется системой управления по мгновенным значениям фазных токов.

Информация о положении ротора обрабатывается микропроцессором, который, согласно программе управления, вырабатывает управляющие ШИМ-сигналы. Низковольтные ШИМ-сигналы микроконтроллера затем преобразуются усилителем мощности (обычно транзисторным мостом) в силовые напряжения, подаваемые на двигатель.

Совокупность датчика положения ротора и электронного узла в ВД и БДПТ можно с определенной долей достоверности сравнить с щеточно-коллекторным узлом ДПТ. Однако следует помнить, что двигатели редко применяются вне электропривода. Таким образом, электронная аппаратура характерна для В почти в той же степени, что и для ДПТ.

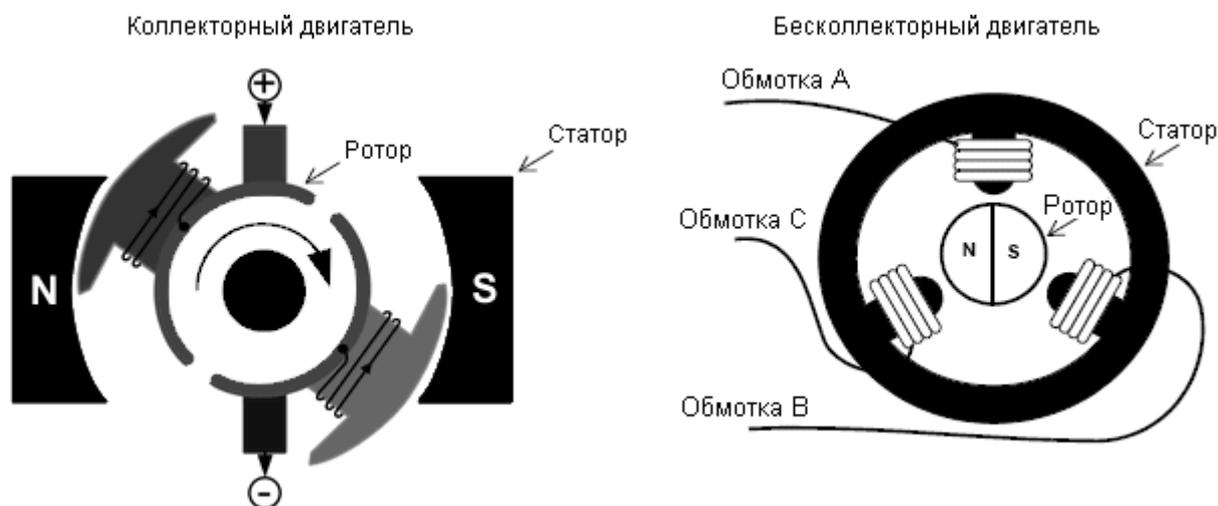


Рис. 2. Устройство бесколлекторного двигателя

Расчетные формулы для симуляции. Бесколлекторный двигатель, подключенный к трехфазной системе электроснабжения, может быть описан уравнениями:

$$\begin{aligned}
v_{ab} &= R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b; \\
v_{bc} &= R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c; \\
v_{ca} &= R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a; \\
T_e &= k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L.
\end{aligned} \tag{1}$$

Символы v , i и e обозначают фазо-фазовые напряжения, фазные токи и фазовые противо-ЭДС соответственно в трех фазах a , b и c . Сопротивление R и индуктивность L соответствуют значениям фазы, а T_e и T_L представляют собой электрический крутящий момент. J – инерция ротора, k_f – постоянная трения, а ω_m – скорость ротора. Противо-ЭДС и электрический крутящий момент могут быть выражены как:

$$\begin{aligned}
e_a &= \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e); \\
e_b &= \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e - \frac{2\pi}{3}); \\
e_c &= \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e - \frac{4\pi}{3}); \\
T_e &= \frac{k_t}{2} \left[F(\theta_e) i_a + F(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) i_b + F(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) i_c \right],
\end{aligned} \tag{2}$$

где k_e и k_t – постоянная противо-ЭДС и постоянный крутящий момент.

Для удобной реализации в Matlab/Simulink эти уравнения должны быть записаны в форме пространства состояний. Эти уравнения должны быть изменены, чтобы получить представление в этом пространстве. Путем преобразований получаем матрицу вида:

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} i'_a \\ i'_b \\ \omega'_m \\ \theta'_m \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_f}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ -\frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ab} - e_{ab} \\ v_{bc} - e_{bc} \\ T_e - T_L \end{pmatrix}; \\
\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix}.
\end{aligned} \tag{3}$$

На рисунке 3 представлена модель бесколлекторного электродвигателя постоянного тока в системе Simulink. Ядро блока бесколлекторного двигателя – это блок пространства состояний, который реализует матричное уравнение пространства состояний.

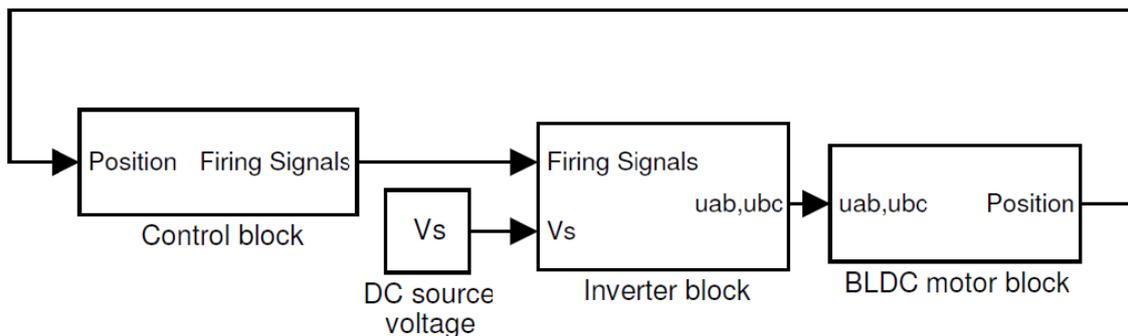


Рис. 3. Модель управления бесколлекторным двигателем

На рисунке 4 показано содержимое блока бесколлекторного двигателя. Блок пространства состояний получает разность между электрическим крутящим моментом и механическим крутящим моментом и двумя сигналами напряжения от инвертора. Трапецевидные функции и сигналы положения хранятся в справочных таблицах, которые изменяют свой выходной сигнал в соответствии со значением электрического угла.

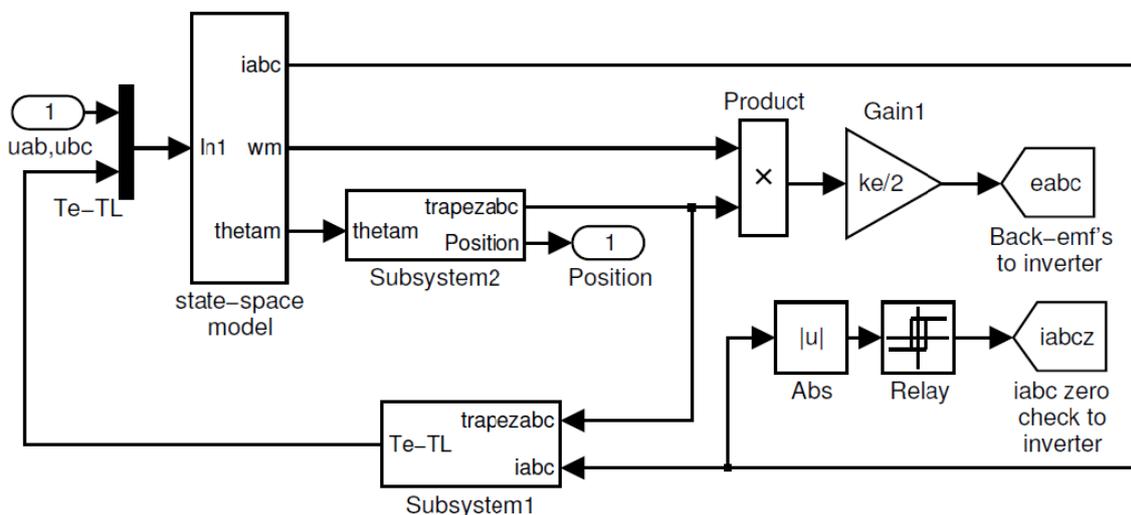


Рис. 4. Содержимое моторного блока

Результаты симуляции. Время моделирования, а также момент и величина крутящего момента одинаковы. Зависимость скорости ротора и крутящего момента от времени показана на рис. 5 и 6.

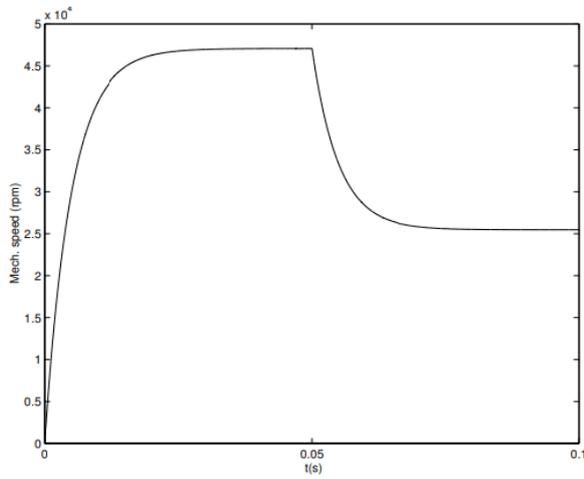


Рис. 5. Скорость ротора

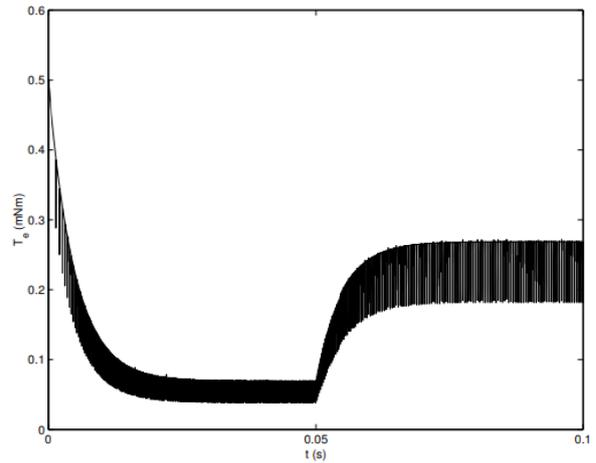


Рис. 6. Электрический крутящий момент

Как можно увидеть из рис. 7, крутящий момент имеет глубокие, но узкие борозды. В этот момент мотор начинает вращаться и БПЛА начинает движение.

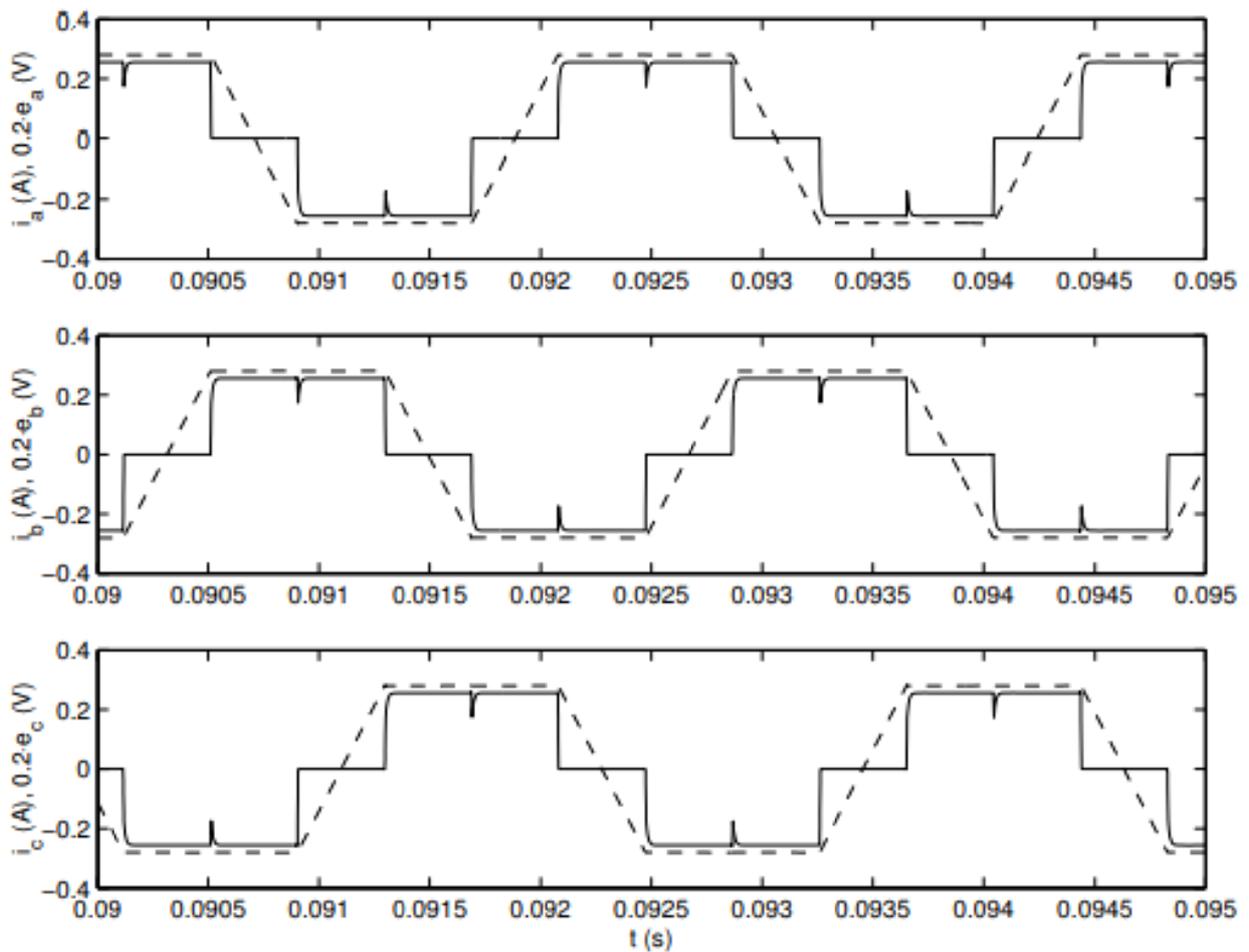


Рис. 7. Вид фазовых токов (непрерывная линия) и противо-ЭДС (пунктирная линия)

Вывод. В данной работе была разработана математическая модель системы регулятор–бесколлекторный двигатель, а также математическая модель регулятора скорости вращения двигателя квадрокоптера с учетом присущих ему нелинейностей. Также была произведена настройка программных библиотек для обмена информацией между ЭВМ тактического уровня, контроллером Pixhawk 4 и бесколлекторным двигателем, а также протестирована возможность управления реальным образцом бесколлекторного двигателя посредством контроллера Pixhawk 4.

Список использованных источников

1. Форум о науке и современных технологиях. – Электронный ресурс : <https://geektimes.ru/hub/history/>
2. EasyJet привлечет к ремонту самолетов беспилотники и Google Glass [Электронный ресурс] / Деловой авиационный портал. – Режим доступа : <http://www.ato.ru/content/easyjet-privlechet-k-remontu-samoletov-bespilotniki-igoogle-glass> (дата обращения: 29.01.2016).
3. Microsoft wants to use-catching drones to fight disease [Электронный ресурс] / Popular Science. – Режим доступа : <http://www.popsci.com/microsoft-drones-willcatch-mosquitos-fight-disease> (дата обращения: 29.01.2016).
4. Ardupilot Community. – Электронный ресурс : <http://ardupilot.org/>
5. DIY Drones. – Электронный ресурс : <http://diydrones.com/>
6. Форум по радиотехнике. – Электронный ресурс : http://www.rcdesign.ru/articles/radio/ppm_pcm
7. Лав, Роберт. Разработка ядра Linux / Роберт Лав. – 2-е изд. ; пер. с англ. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2006. – 448 с.
8. Design and Prototyping Methods for Brushless Motors and Motor Control / Shane W. Colton, B. S. // Mechanical Engineering. – 2008. – Massachusetts Institute of Technology.
9. Овчинников, И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе / И. Е. Овчинников. – Корона век Санкт-Петербург, 2006.
10. Kyeong-Hwa Kim and Myung-Joun. Performance comparison of pwm-inverter and variable dc link inverter schemes for high-speed sensorless control of bldc motor. – Electronics Letters, 38(21): 1294–1295, October 2002.
11. Low, K. S. Approaches to the control of torque and current in a brushless dc drive / K. S. Low, M. F. Rahman and K. W. Lim.

Д. Ю. Кукишев, В. Н. Мещеряков
(ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»,
Липецк, Россия)

ПОИСКОВЫЙ АЛГОРИТМ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ НА ПРИМЕРЕ СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье приведено описание векторной коррекции в скалярной системе управления, основанной на поиске минимального значения тока статора. Для подтверждения теоретических сведений в программной среде MatLab смоделированы переходные процессы.

D. Yu. Kukishev, V. N. Meshcheryakov
(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

SEARCH ALGORITHM IN THE ENERGY-SAVING ELECTRIC DRIVE ON THE EXAMPLE OF A SCALAR CONTROL SYSTEM

Abstract. The article describes the vector correction in a scalar control system based on the search for the minimum value of the stator current. To confirm the theoretical information in the MatLab software, transients are modeled.

На сегодняшний день одной из глобальных проблем на производстве является энергосбережение. Существует множество способов повысить энергоэффективность производства, но наиболее актуальный – это применение управляемых электроприводов. Таким образом, внедрение частотного преобразователя в систему управления двигателем все чаще и чаще производится именно в целях повышения энергосбережения электропривода. Улучшение энергетических характеристик электропривода достигается путем использования современных ПЧ, обладающих улучшенными энергетическими характеристиками, и за счет внедрения на производстве новейших алгоритмов управления двигателем. К сожалению, типовые СУ асинхронными электроприводами сильно не изменились с момента их изобретения, используемые методы управления не являются энергоэффективными. Несмотря на то, что теория и элементная база были разработаны уже в XX веке, лишь только в XXI веке новые способы повышения точности регулирования скорости, повышения быстродействия привода, повышения энергетической эффективности в двигателях переменного тока стали востребованными и получили мощный толчок в развитии.

На производстве электроприводы большинства механизмов имеют мощность, в 2–3 раза превышающую необходимую. Кроме того, электроприводы некоторых механизмов (прессов, кузнечного оборудования, станков, металлургических агрегатов и др.) по технологическим особенностям часть времени ра-

ботаю с недогрузкой. Так же на сегодняшний день на НЛМК более 2000 подъемно-транспортных механизмов, из них немалую долю составляют крановые механизмы. Большинство кранов характеризуются повторно-кратковременными режимами работы ($PB = 25 \dots 40$), частыми пусками и торможениями, поэтому при проектировании такого механизма берут двигатель, у которого предполагаемый максимальный статический момент не должен превышать 0,3 от момента номинального двигателя. Двигатель постоянно работает в недогруженном состоянии, а значит с меньшим КПД. Именно поэтому большую актуальность имеет проблема разработки различных скалярных и векторных систем управления на основе преобразователей частоты, которые будут обладать достаточной точностью и быстродействием в регулировании скорости при оптимальном использовании энергетических и динамических возможностей электродвигателей при большом диапазоне изменения момента и скорости.

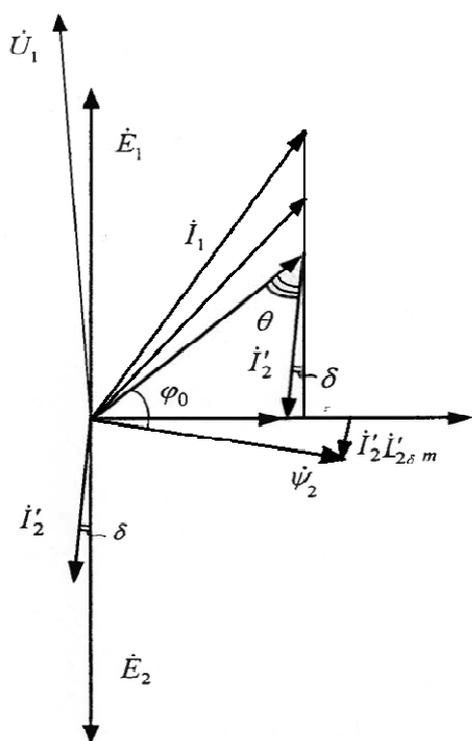


Рис. 1. Векторная диаграмма обычной скалярной системы управления

Оптимальное использование энергетических возможностей в данной статье будем добиваться за счет минимизации потерь и тока статора в асинхронном электроприводе.

В типовой скалярной системе управления при изменении нагрузки на валу двигателя угол φ_0 между током статора и потокосцеплением ротора изменяется в широком диапазоне в зависимости от нагрузки (см. рис. 1).

В скалярной системе управления с коррекцией, основанной на принципе поискового алгоритма, угол φ_0 будет поддерживаться на таком уровне, при котором полный ток статора будет иметь наименьшее значение.

Поисковый алгоритм работает следующим образом: ступенчато вводится коррекция $\Delta = -5$ В (см. рис. 2) на напряжение ПЧ. Если ток статора начал снижаться, то вводится еще раз ступенчатая коррекция $\Delta = -5$ В и т.д., пока ток статора не начнет расти. Если ток статора начал расти, то вводится $\Delta = +5$ В, до тех пор, пока ток статора не перестанет расти и не снизится до минимального значения. Если ток статора изначально начал расти, то далее вводится ступенчатая коррекция, но с положительным знаком (т.е. увеличиваем напряжение) $\Delta = +5$ В. Если ток начинает падать, то вводим еще раз ступенчатую коррекцию $\Delta = +5$ В и т.д., пока ток не будет минимальным.

Ограничение на напряжение статора в модели 420 В.

Результаты моделирования в программном пакете Matlab Simulink представлены на рис. 2 – 5.

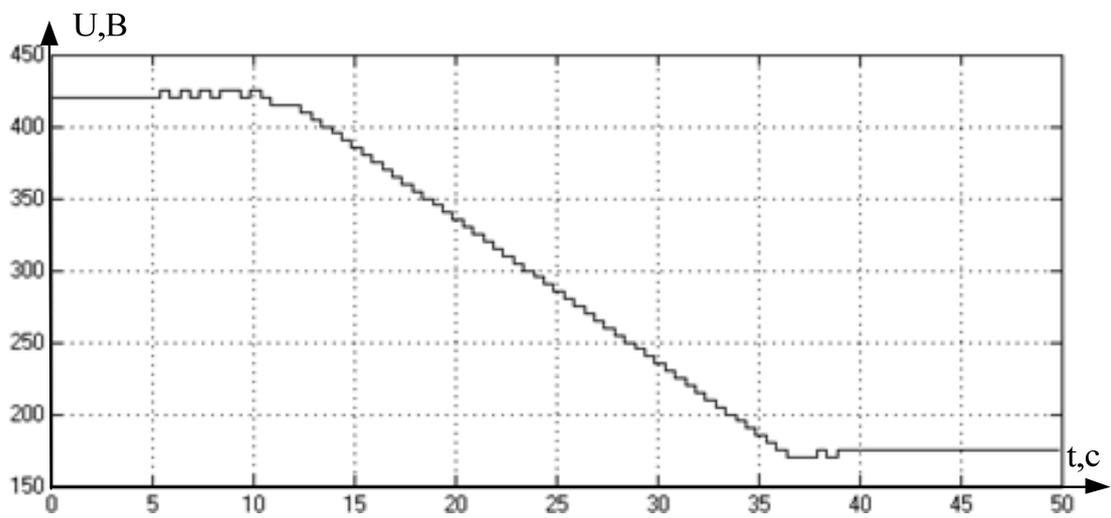


Рис. 2. Переходный процесс напряжения ПЧ

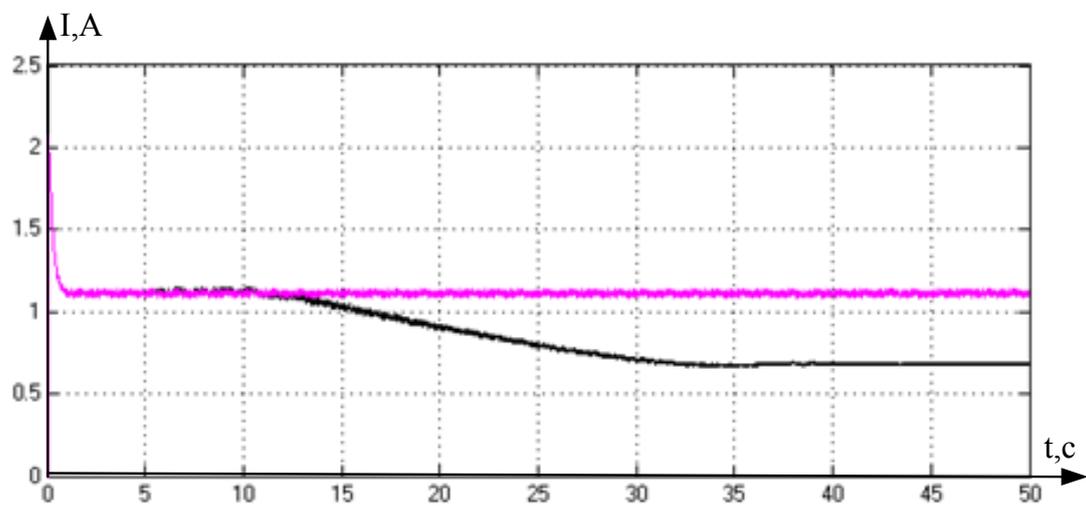


Рис. 3. Переходный процесс тока статора:
розовый – система без коррекций; черный – система с коррекцией

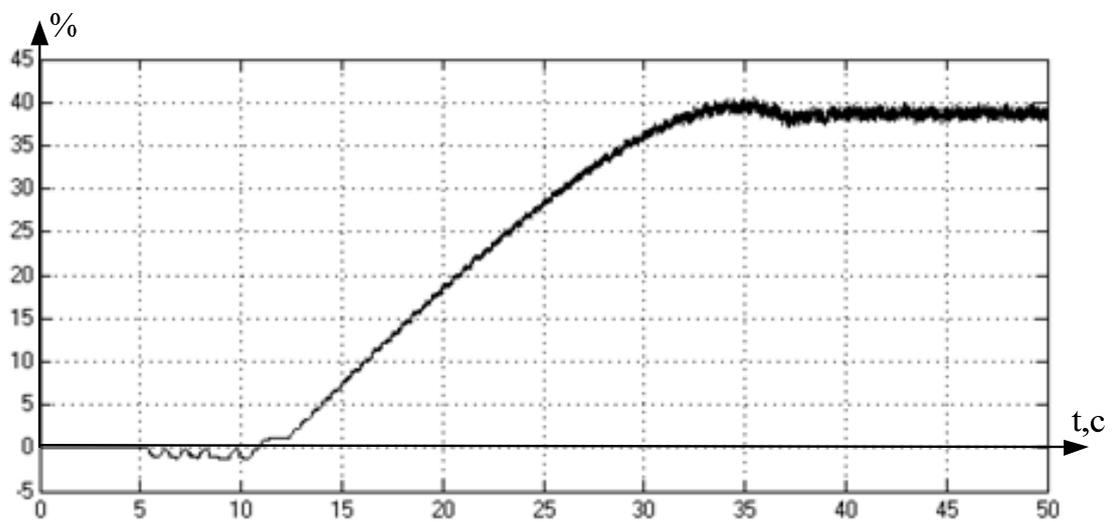


Рис. 4. Снижение тока статора в процентах (%)

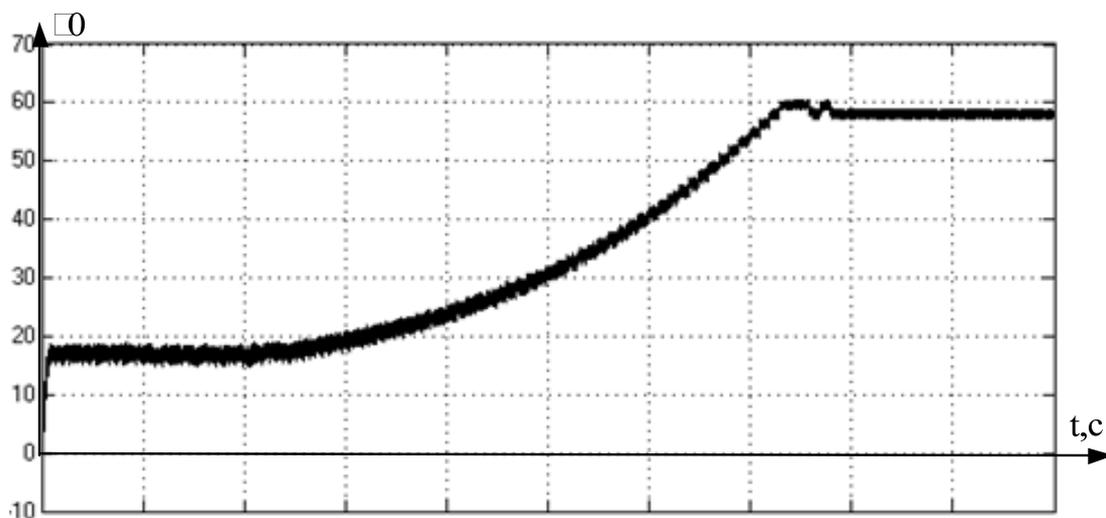


Рис. 5. Переходный процесс угла φ_0

Проанализировав все вышеприведенные графики, можно сказать, что скалярная система управления с коррекцией, основанной на поисковом алгоритме, уменьшает ток статора на 40% (см. рис. 3 и 4) при нагрузке 10% от номинальной. При этом угол между током статора и потокосцеплением ротора держится на уровне 56° (см. рис. 5).

Статья написана при поддержке гранта РФФИ 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электрических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

Список использованных источников

1. Пат. РФ № 2132110, кл. Н 02 Р 21/00. Способ оптимального векторного управления асинхронным электродвигателем и электропривод для осуществления этого способа / В. А. Мищенко, Н. И. Мищенко, А. В. Мищенко ; приоритет 25.03.1998 ; опубл. 20.06.1999, Бюл. № 6.
2. Пат. № 2254666. Электропривод переменного тока / П. Н. Левин, В. Н. Мещеряков. – МКИ Н 02 Р 7/42. 20.06.2005, Бюл. № 17.
3. Пат. № 2512873 С1. Электропривод переменного тока / В. Н. Мещеряков, Т. В. Синюкова, О. В. Мещерякова. – Н 02 Р 27/06, 27/08. 10.04.2014, Бюл. № 10.
4. Пат. № 2528612 С2. Электропривод переменного тока / В. Н. Мещеряков, А. И. Бойков, О. В. Мещерякова. – Н 02 Р 27/06. 20.09.2014, Бюл. № 26.

А. И. Глущенко
(СТИ НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол, Россия)

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО НАСТРОЙЩИКА
ДЛЯ АДАПТАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ
SIEMENS SINAMICS DCM ПРИ УПРАВЛЕНИИ
ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Аннотация. В работе нестационарность момента инерции двигателя постоянного тока и возникающие возмущения компенсируются путем настройки в реальном времени параметров регулятора скорости. Такая настройка производится с помощью разработанного ранее нейросетевого настройщика, реализованного на языке StructuredText и помещенного в память промышленного контроллера.

A. I. Glushchenko
(STI NITU “MISiS”, Stary Oskol, Russia)

**NEURAL TUNER APPLICATION
TO ADJUST SPEED CONTROLLER PARAMETERS
OF SIEMENS SIMATIC DCM TO CONTROL DC MOTOR**

Abstract. Non-stationarity of an inertia moment of a DC motor and acting disturbances are rejected by a speed controller parameters adjustment performed in real time. Such adjustment is made by a previously developed neural tuner, implemented with the help of Structured Text language and stored in memory of an industrial controller.

Введение. На современном этапе развития промышленности одной из важнейших является проблема повышения эффективности управления технологическими процессами на различных стадиях производства [1]. Существующие системы и методы управления такими процессами являются линейными (П, ПИ и ПИД регуляторы) и строятся исходя из предположения о стационарности параметров и отсутствии нелинейностей рассматриваемого агрегата [2]. Однако в действительности реальные промышленные агрегаты (объекты управления – ОУ) являются нелинейными, а их характеристики подвержены флуктуациям, обусловленным либо изменениями параметров технологического процесса (изменение задания по температуре, загрузки для печей, изменение параметров электрической и механической частей электропривода ввиду нагрева, износа и др.), либо внешними воздействиями (открытие дверцы печи, выход из строя газовой горелки, подача заготовки в прокатные валки и др.). В таких ситуациях применение линейных регуляторов приводит к ухудшению качества переходных процессов и росту энергопотребления. В большинстве случаев подобные агрегаты являются высокомоментными, поэтому учет нелинейности даже в 1...2% принесет существенный экономический эффект. К таковым относятся электродвигатели

постоянного тока, применяемые в черновых прокатных клетях многих металлургических предприятий, в том числе и АО «Оскольский электрометаллургический комбинат».

Для того чтобы добиться упомянутого эффекта, необходимо применение алгоритмов управления, способных учитывать и компенсировать нелинейные эффекты при выработке управляющего воздействия. Считается, что наибольшие шансы на практическое применение имеют настройщики уже используемых на производстве линейных регуляторов [2]. Большинство подходов к их построению требуют наличия или модели объекта управления [1, 3], или эталонной модели [4], получить которые в условиях производства достаточно сложно.

Автором данной работы был предложен подход к построению настройщика, не требующий подобных моделей в явном виде и сочетающий в себе нейронные сети для вычисления параметров регулятора и базу знаний, определяющую когда и с какой скоростью оперативно обучать такие сети [5]. Ранее он был успешно апробирован на моделях нагревательных печей и электроприводов постоянного тока. В данном исследовании настройщик будет реализован на языке Structuredtext и помещен в память промышленного контроллера Siemens, применяемого на производстве. Это позволит апробировать настройщик на реальном электроприводе постоянного тока.

Описание нейросетевого настройщика. Предлагается следующая структура настройщика – рис. 1.

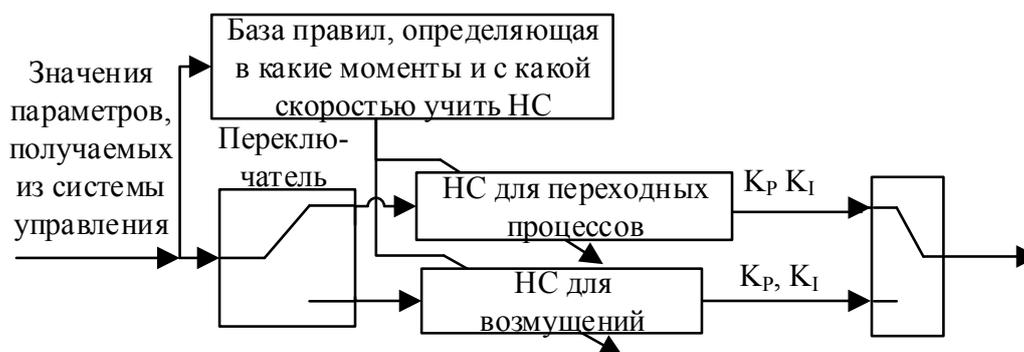


Рис. 1. Функциональная схема предлагаемого решения

Нейронная сеть (НС) применена для вычисления на своих выходах коэффициентов регулятора, не требуя при этом модели ОУ. Она обучается оперативно, а моменты времени для обучения и его скорость определяются базой правил, которая отражает опыт эксперта по настройке регуляторов, учитывая специфику ОУ. Условия правил – это описание ситуаций, когда качество управления не отвечает требованиям. Следствия содержат формулы расчета скорости оперативного обучения НС. Более подробно принципы выбора параметров настройщика приведены в работе [5].

Эксперименты связаны с применением настройщика для электродвигателя постоянного тока, управление которым ведется с помощью контроллеров и преобразователей, реально применяемых на производстве.

Описание экспериментального стенда. Общая схема стенда представлена на рис. 2.

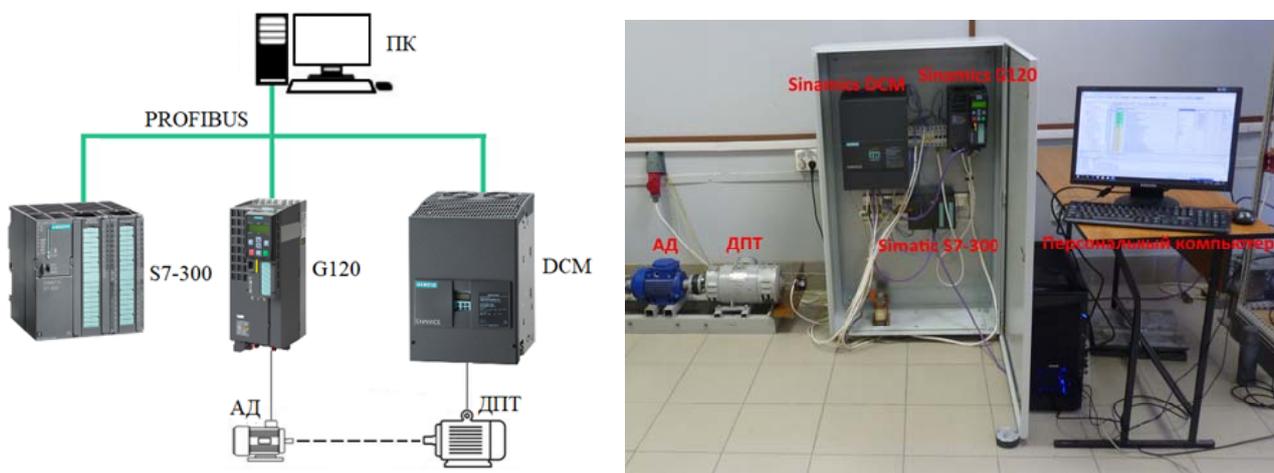


Рис. 2. Общая схема экспериментального стенда
(АД – асинхронный двигатель, ДПТ – двигатель постоянного тока)

В состав стенда входят:

- 1) двигатель постоянного тока (ДПТ) 2ПН90ЛУХЛ4 мощностью 0,55 кВт;
- 2) асинхронный двигатель (АД) АИР71В6У3 мощностью 0,55 кВт;
- 3) преобразователь SINAMICS DCM (включающий тиристорный преобразователь, каскадную систему управления, состоящую из контуров для тока якоря и скорости, и т.д.);
- 4) преобразователь для АД SinamicsG 120 (включающий преобразователь частоты, систему векторного регулирования момента на валу электродвигателя и т.д.);
- 5) ПЛК Simatic S7-300;
- 6) ПК, включающий плату CP5611 для подключения к сети Profibus, с установленными пакетами SimaticStep7, Starter. Именно Starter используется в режиме реального времени для записи данных, на основе которых будут построены сравнительные графики переходных процессов.

ПК, ПЛК, SinamicsG120 и DCM объединены в сеть Profibus. ДПТ является объектом исследования, в то время как АД предназначен для моделирования нагрузки на ДПТ.

ПЛК взаимодействует с электроприводами путем передачи и приема телеграмм. Для обмена с АД была использована телеграмма Standarttelegram 1, PZD 2/2, а для обмена с ДПТ – Siemenstelegram 352, PZD 6/6, так как она содержит свободно формируемую часть, в которую записывает свои выходы ней-

росетевой настройщик – это значения коэффициентов пропорциональной K_P и интегральной K_I части регулятора скорости: $T_I = K_P / K_I$. Сам настройщик также находится в памяти контроллера.

Перед началом экспериментов оба электропривода были введены в эксплуатацию их штатными средствами с использованием ПО Starter. При этом была произведена автоматическая настройка регуляторов для ДПТ и АД. Когда производилась настройка для ДПТ, АД не управлялся и фактически представлял собой «маховик» на валу ДПТ. Когда производилась настройка для АД, ДПТ также не управлялся. В частности, для регулятора скорости ДПТ были получены следующие значения коэффициентов: $K_P = 1,2$; $T_I = 0,124$ с (именно с них начнет работу нейросетевой настройщик). Перерегулирование при этом составило 5,3%, а статическая ошибка – порядка 1%.

Настройка регулятора контура скорости для выбранного графика изменения задания. В данном эксперименте управление АД не производится. Он играет роль маховика на валу ДПТ, увеличивая тем самым общий момент инерции.

ПЛК формирует следующий график изменения задания для электропривода постоянного тока: 0 об/мин – 520 об/мин – 0 об/мин. Он повторяется 3 раза. После первого выполнения данного графика спарка двух двигателей физически разъединяется, что приводит к уменьшению общего момента инерции примерно на 50%. Далее график заданий выполнялся еще 2 раза. Результаты эксперимента приведены на рис. 3. Время на разъединение двигателей вырезано.

Нейросетевой настройщик обнаружил увеличение перерегулирования относительно номинального (оно составило 10,5%) и произвел настройку регулятора скорости. Это позволило достичь перерегулирования 5,9%, которое практически совпадает с номинальным, примерно за 4 с.

Компенсация влияния возмущающих воздействий. Эксперимент проводился следующим образом. АД присоединен к валу ДПТ через муфту. На привод постоянного тока подается задание 520 об/мин (параметры его регулятора скорости номинальны: $K_P = 1,2$; $T_I = 0,124$ с). Далее в момент времени $t = 36$ с на электропривод переменного тока подается задание по моменту ($M_{\text{зад}} = 2 \text{ Н}\cdot\text{м} = 0,57 M_{\text{номинальный}}$), что приводит к снижению скорости вращения. Привод постоянного тока должен вернуть скорость к номинальной (компенсировать возмущение).

Затем для сравнения результатов настройщика с классическим ПИ-регулятором с постоянными параметрами $K_P = 1,2$; $T_I = 0,124$ с был проведен аналогичный эксперимент, но без использования настройщика.

Сравнение результатов работы системы с настройщиком и без настройщика при компенсации возмущения представлено на рис. 4.

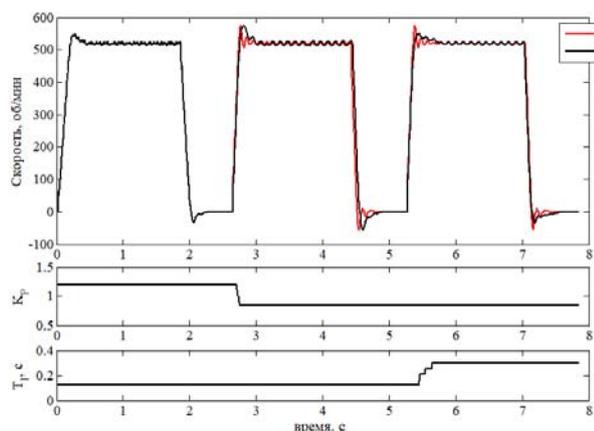


Рис. 3. Результаты эксперимента с измененным моментом инерции

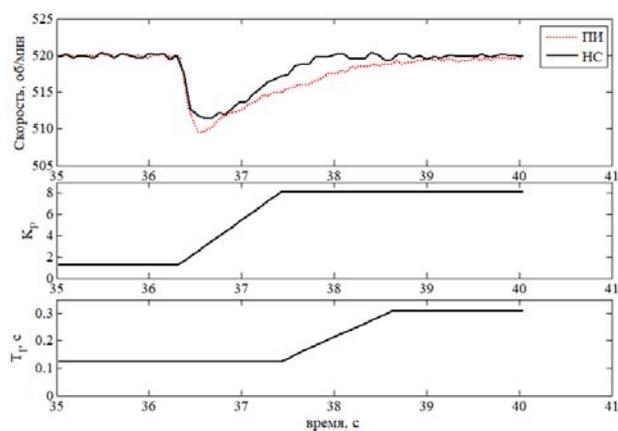


Рис. 4. Результаты эксперимента по компенсации возмущения

Применение настройщика позволило уменьшить максимальное отклонение скорости от задания на 25% по сравнению с обычным ПИ-регулятором. Время компенсации возмущения было сокращено на треть.

Выводы. Применение настройщика позволило как снизить перерегулирование практически в 2 раза при изменении момента инерции двигателя, так и снизить время компенсации возмущения практически на треть.

Список использованных источников

1. Александров, А. Г. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах / А. Г. Александров, М. В. Паленов // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 2. – С. 16 – 30.
2. Berner, J. An experimental comparison of PID autotuners / J. Berner et al. // Control Engineering Practice. – 2018. – V. 73. – P. 124 – 133.
3. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МЭИ, 2008. – 396 с.
4. Шпилева, О. Я. Системы управления с аддитивной настройкой на основе метода вектора скорости / О. Я. Шпилева // Автометрия. – 2011. – № 3. – С. 92 – 99.
5. Глущенко, А. И. О методе определения скорости обучения нейронной сети для задачи оперативной настройки линейных регуляторов при управлении нелинейными объектами / А. И. Глущенко // Управление большими системами. – 2018. – Вып. 72. – С. 52 – 107.

ЗАДАЧА СТАБИЛИЗАЦИИ МАЯТНИКА ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ НА УПРАВЛЯЮЩИЙ МОМЕНТ ВРАЩЕНИЯ

Аннотация. В работе рассмотрена задача стабилизации физического маятника, прикрепленного к валу электродвигателя. Развиваемый момент полагается ограниченным и недостаточным для того, чтобы везде преодолевать сопротивление силы тяжести. Предложена логика построения задачи слежения для ДПТ с управлением в виде разрывной функции с постоянной амплитудой.

Yu. M. Rassadin

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia)

PROBLEM OF PENDULUM STABILIZATION BY BOUNDED ACTUATOR TORQUE

Abstract. The paper deals with the problem of stabilization of the physical pendulum attached to the motor shaft. The actuator's moment is supposed to be limited and insufficient to overcome the resistance of gravity. The logic of the tracking subproblem synthesis is proposed for DC-motor with a discontinuous constant amplitude feedback function.

Введение. В данной работе рассматривается задача стабилизации физического маятника [4], закрепленного на валу двигателя постоянного тока [6] (ДПТ), в вертикальном неустойчивом положении равновесия. Момент вращения, развиваемый ДПТ, полагается ограниченным, причем максимальное возможное значение $\tau_{\max} > 0$ недостаточно для того, чтобы преодолеть момент вращения, создаваемый силой тяжести. Таким образом, при выборе обратной связи по невязке угла отклонения маятник не сможет совершить поворот в вертикальное положение, а остановится в некотором углу $\alpha = \arcsin(\tau_{\max}/mgl)$. Для преодоления этого барьера предлагается декомпозиция задачи стабилизации на два этапа, а именно начальная накачка энергии в колебания системы, которая позволит «проскочить» проблемный угловой сектор, и дальнейшая стабилизация стержня в заданном положении. Реализуемость подобного подхода интуитивна, объяснима примерами выступлений воздушных гимнастов. На втором этапе, при удерживании стержня в верхнем положении, возможно применение линеаризованной по первому замечательному пределу модели объекта.

Постановка задачи. Система уравнений, описывающая объект управления, имеет вид [3, 6]

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega, \\ (J + ml^2)\dot{\omega} &= -mgl \sin(\theta) + \tau, \\ \dot{\tau} &= -A\omega - D\tau + Bu,\end{aligned}\tag{1}$$

где θ – угол отклонения стержня; ω – угловая скорость; g – ускорение свободного падения; m, l – масса стержня и расстояние от центра масс до оси вращения; τ – момент вращения, развиваемый ДПТ; A, D, B – положительные конструктивные параметры ДПТ; u – реальное управление, выбор которого определяется целью управления и априорными ограничениями.

Систему (1) с помощью невырожденной замены переменных можно привести к более лаконичной форме записи:

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= -a_{21}\sin(\theta) + \tilde{\tau}, \\ \dot{\tilde{\tau}} &= -a_{32}\omega - a_{33}\tilde{\tau} + bu.\end{aligned}\tag{2}$$

Целью управления в данной работе является перевод маятника из нижнего положения равновесия в неустойчивое верхнее и удержание его там, а в терминах систем (1), (2) можно записать $\theta \rightarrow 0$, $\omega \rightarrow 0$.

Синтез базового закона управления. Рассмотрим кинетическую энергию системы (2), которая равна энергии вращательного движения $E = J_c \omega^2 / 2$, где J_c – эквивалентный момент инерции стержня и ротора ДПТ относительно основной оси вращения. Продифференцировав энергию по времени, в терминах системы (2) получим

$$\dot{E} = J_c \omega \dot{\omega} = J_c \omega (-a_{21}\sin(\theta) + \tilde{\tau}).\tag{3}$$

В соответствии с блочным принципом синтеза [1], приведенный момент вращения ДПТ $\tilde{\tau}$ должен рассматриваться в качестве управляющего воздействия для угловой скорости ω . Подход базового алгоритма подразумевает синтез закона управления в предположении, что все величины известны или доступны прямому измерению, поэтому моментом силы трения, который полагается неизвестным, а влияет лишь на точность регулирования в верхней точке, в данном разделе можно пренебречь. Полученные в результате соотношения будут использованы для постановки задачи слежения в подсистеме ДПТ. Решая задачу отработки выбранного момента с помощью ДПТ, можно реализовать выбранный на предыдущем шаге закон обратной связи.

Модифицированная поверхность скольжения. Описание механической подсистемы, как правило, сопровождается вводом неопределенных величин различной природы, например неизвестного в общем случае момента силы трения, которые не могут быть непосредственно компенсированы управлением, и поэтому могут рассматриваться в качестве ограниченных внешних несогласованных (unmatched) возмущений [2, 4]. Вихревые алгоритмы [2] управления позволяют обеспечить асимптотическую инвариантность к возмущениям такого рода. Закон обратной связи, синтезируемый по этому алгоритму, состоит из двух аддитивных величин – непрерывной и разрывной, что создает сложно-

сти при реализации. Данную проблему предполагается решить на основе метода эквивалентного управления [4]. Этот метод позволит выбрать обратную связь в классе разрывных функций с постоянной амплитудой, что является оптимальным с точки зрения, например тепловых потерь в реальных управляющих устройствах.

Рассмотрим систему уравнений

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -vml \cos(q_1) q_2 - \eta, \\ \dot{v} &= -Av - Bq_2 + Bu, \end{aligned} \quad (4)$$

где $e = E - E_c$ – невязка энергии маятника, а η обозначает негативное воздействие неучтенных моментов сил. При описанных выше ограничениях на составляющие модели объекта на основе вихревых алгоритмов запишем уравнения для поверхности скольжения s [4]:

$$\begin{aligned} s &= v - v^*, \\ \dot{v}^* &= -\alpha v^* - M \operatorname{sgn}(e). \end{aligned} \quad (5)$$

Вихревой алгоритм, как было показано в работе [2], обеспечивает асимптотическую инвариантность к неизвестным несогласованным возмущениям, в качестве которых рассматривается воздействие неучтенных моментов. Продифференцируем уравнение поверхности скольжения s в соответствии с уравнениями (4) и (5):

$$\dot{s} = -Av - Dq_2 + Bu + \alpha v^* + M \operatorname{sgn}(e). \quad (6)$$

Выбрав истинное управление в виде $u = -U \operatorname{sgn}(s)$, при достаточно большой амплитуде U можно обеспечить соотношение $s = 0$, а значит и реализацию вихревого алгоритма [2]. Тогда невязка энергии сойдется к нулю, что решает задачу накачки энергии маятника до требуемого значения.

Заключение. В данной работе рассмотрена задача стабилизации маятника, закрепленного на валу ДПТ. В постановке задачи было заложено ограничение на развиваемый ДПТ момент вращения, который был недостаточен для преодоления силы тяжести. Цель управления была достигнута за счет декомпозиции процедуры синтеза на две последовательно решаемые подзадачи меньшей размерности. Стоит отметить, что подход базового алгоритма подразумевает синтез закона управления в предположении, что все величины известны или доступны прямому измерению. В реальных установках часто используется инкрементальный датчик угла поворота вала, а угловая скорость оценивается с помощью методов конечных разностей (для дискретных реализаций), дифференцирующего звена, наблюдателя состояния или других итерационных процедур. Более подробное рассмотрение этого вопроса должно быть предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта 18-01-00846а.

Список использованных источников

1. Принцип блочного управления / С. В. Дракунов, Д. Б. Изосимов, А. Г. Лукьянов, В. А. Уткин и др. // Автомат. и телемех. – Ч. I: 1990. – № 5. – С. 3 – 13; Ч. II: 1990. – № 6. – С. 20 – 31.
2. Кочетков, С. А. Инвариантность в системах с несогласованными возмущениями / С. А. Кочетков, В. А. Уткин // АиТ. – 2013. – № 7. – С. 46 – 83.
3. Ландау, Л. Д. Краткий курс теоретической физики. – Кн. 1: Механика. Электродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – М. : Наука, 1969. – 271 с.
4. Уткин, В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления / В. И. Уткин. – М. : Наука, 1981. – 368 с.
5. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – М. : Энергия, 1979.
6. Astrom, K. J. Swinging up a pendulum by energy control / K. J. Astrom, K. Furuta // Automatica. – 2000. – V. 36, Is. 2. – P. 287 – 295.

И. Н. Донских¹, Е. А. Кискин¹, М. А. Заводчиков¹, А. А. Стрельцов²

(¹ Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ,
Тамбов, Россия;

² ФЦНИВТ «СНПО «Элерон», Москва, Россия)

ИННОВАЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Аннотация. В статье приведены результаты анализа технологий управления энергоресурсами, обеспечивающими их рациональное использование и регенерацию энергоресурсов.

I. N. Donskikh¹, E. A. Kiskin¹, M. A. Zavodchikov¹, A. A. Streltsov²

(¹ Interspecies Center of Training and Combat Use of Electronic Warfare Troops
(Training and Testing), Tambov, Russia;

² FTSNIVT “SNPO” Aileron”, Moscow, Russia)

INNOVATIVE ENERGY AND PERSPECTIVE TECHNOLOGIES OF ENERGY SAVING

Abstract. The article presents the results of the analysis of energy management technologies that ensure their rational use and energy recovery.

Основная роль в формировании нового облика отечественной энергетики может и должна принадлежать целому ряду недавно разработанных технологий в области энергетики, переработки топлива и нетопливных отходов, которые сейчас практически не находят применения и существуют по большей части в опытно-промышленных установках [1].

Перечислим инновационные возможности ряда энергосберегающих технологий:

1. Цикл углеводородов: к искусственным нефти и газу. В энергетике и химической промышленности используется большое количество углеводородных соединений, используемых в качестве топлива, а также сырья для органического синтеза и производства пластических масс. По мере развития промышленности потребление углеводородных соединений будет только возрастать, что требует увеличения главного источника их получения – нефти и природного газа. В 1990-е годы разработана технология термической деполимеризации, которая позволяет разлагать сложные углеводородные соединения на простые, с получением смеси простых углеводородных соединений, аналогичной природной нефти – искусственной нефти.

Первоначально технология была рассчитана на получение искусственной нефти, но дальнейшее ее развитие российскими химиками показало, что на ее основе может быть разработана технология специализированной переработки углеводородных соединений.

Ученые Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева разработали технологию переработки ряда полимеров (полиэтилен, полипропилен, полистирол и полиэтилентерефталат) в бензин, позволяющий получать около 1 л бензина из 1 кг полимерных отходов.

Основное значение производства искусственной нефти заключается сразу в нескольких моментах [2]. Во-первых, резко расширяется круг сырья для подобной переработки. Для нее годятся любые материалы, содержащие углеводородные соединения. В частности, это позволяет перерабатывать в высококачественное топливо малоценные виды энергоносителей: бурый уголь, сланцы, дрова, торф, а также использовать нетопливные виды сырья: органические отходы сельскохозяйственного производства, биологические отходы, сточные воды, отстой канализационных вод и т.д. Во-вторых, переработке могут быть подвергнуты отходы, содержащие углеводородные соединения: резина, пластмассы, полимеры, мазут, битум, асфальт, которые сейчас откладываются в виде бытовых и промышленных отходов. Переработка отходов в искусственную нефть позволяет создать *замкнутый цикл обращения углеводородов по схеме: нефть – органический синтез – полимеры – отходы – искусственная нефть*. Это позволяет резко, в разы сократить использование природной нефти в качестве сырья для органического синтеза. Это означает переход в использовании углеводородных соединений *от топливного цикла переработки нефти к нефтехимическому циклу*. В-третьих, особенности технологии получения искусственной нефти позволяют использовать получаемый горючий газ для энергетических нужд самой установки термической деполимеризации.

В настоящее время эта технология существует только в немногочисленных опытно-промышленных образцах и конструкторских разработках. Производства, основанные на этих технологиях, работающие на проектной мощно-

сти, отсутствуют. Вместе с тем в России накапливается большое количество отходов, пригодных для переработки.

Внедрение подобной технологии вызовет сокращение использования природной нефти в органическом синтезе и может вызвать сокращение занятости в нефтедобыче. Это создаст дополнительные рабочие места, в том числе для квалифицированного инженерного персонала, в крупных городах и промышленных центрах. Также потребуется временная занятость в ликвидации свалок и полигонов с захоронениями отходов этого типа.

2. Использование бытовых отходов в топливных целях. В России ежегодно образуется по различным оценкам от 27 до 54 млн т (около 130 млн м³) твердых бытовых отходов, к сожалению, по большей части применяемые методы переработки отходов либо неэффективны, либо опасны. Это является причиной низкой доли перерабатываемых твердых бытовых отходов.

Отходы могут стать неплохим источником сырья для производства энергоносителей, сопоставимых с природными источниками. К тому же, в отличие от природных месторождений, отходы – это «возобновляемый» ресурс [3].

Существует технология получения биогаза, состоящего из 55...75% метана и 25...45% оксида углерода с теплотворной способностью от 4800 до 6000 ккал/м³, в зависимости от содержания метана. В этом отношении биогаз является *практически точным аналогом природного газа, только искусственного происхождения*. Из накапливаемых в течение года бытовых и сельскохозяйственных отходов (около 300 млн т сухой массы) можно получать около 90 млрд м³ газа ежегодно.

Переработка твердых бытовых отходов создает новую отрасль промышленности, которая потребует рабочих рук. Но в свете неблагоприятного демографического тренда главным направлением развития этой сферы можно назвать полную автоматизацию и роботизацию переработки твердых бытовых отходов.

3. Новые пути использования ископаемого топлива. Важнейшую роль в обеспечении энергетики топливом играет ископаемое топливо, в частности уголь и торф. Потребление угля в России в год составляет около 200 млн т (206,9 млн т в 2004 году). При подобном потреблении наличных запасов ископаемого топлива хватит на 2175 лет.

В рамках сложившейся топливной модели экономически эффективен переход на уголь при внутренней цене на газ свыше 125 долларов за 1000 м³. Однако развитие потребления угля в России сталкивается в рядом трудностей.

Во-первых, генерация тепловой и электрической энергии с применением угольного топлива дороже, чем с применением газа.

Во-вторых, в России очень большое транспортное плечо перевозок угля.

В-третьих, требуются дополнительные расходы на обеспечение экологической чистоты сжигания угля.

В рамках современных технологий уголь может выступать в качестве топлива, сырья для черной металлургии (топливо + восстановитель для железа),

сырья для переработки в жидкие углеводородные соединения, сырья для переработки в горючие газы. Для развития энергетики наиболее интересными направлениями представляются *способы переработки угля в жидкое или газообразное топливо*. Это решает вопрос технологических трудностей при сжигании, образовании золы и шлаков.

Красноярская компания «Сибтермо» разработала перспективный метод коксования бурого угля с использованием модернизированной технологии пиролиза, комбинированный с выработкой электрической и тепловой энергии. В результате этого из 1 т бурого угля Канско-Ачинского бассейна выходит до 300 кг кокса и около 1,5 Гкал горючего газа. Полученный кокс извлекается из агрегата и может быть использован в качестве топлива, а в газ сжигается для получения пара, который может быть использован для генерации электрической или тепловой энергии.

Второй метод заключается в подаче в камеру сгорания воды или водяного пара, в результате чего получается горючий синтез-газ – смесь монооксида углерода и водорода с примесью азота и оксида углерода (примеси около 11%). Подобный синтез-газ имеет теплоту сгорания 2800 ккал/м³.

Получение синтетического топлива из угля можно вести при условии переработки наиболее ценных марок угля («Г», «Ж», «ДП» и др.) или в качестве побочного продукта переработки угля по другим технологиям.

Выработка газового топлива из угля представляет собой намного более устойчивую отрасль промышленности, имеющую гораздо лучшую сырьевую базу. Это означает большую устойчивость энергетики на долгосрочный период. Развитие российской промышленности и экономики, при условии полного перехода на потребление синтетического газового топлива, больше не будет зависеть от запасов газа и истощения газовых месторождений. Возможности энергетики будут зависеть главным образом от мощностей по добыче угля и получению синтетического газа.

4. Регенерация ядерного топлива. В России также существует дефицит урана, который сейчас покрывается из складских запасов. АЭС в России потребляют 9 тыс. т урана в год, тогда как добывается не более 3 тыс. т, и еще существует экспорт урана.

Вместе с тем существует другой способ получения ядерного топлива из накопленных отходов и отработанного ядерного топлива. В России накоплено большое количество отработанного ядерного топлива, а также отходов обогащения урана. Например, в хранилище отработанного ядерного топлива в Железногорске хранилось 10 299 облученных тепловыделяющих сборок реакторов типа ВВЭР-1000 весом 4588 т.

Отработанное ядерное топливо содержит в себе изотопы, пригодные для дальнейшего использования. В одной тонне отработанного ядерного топлива, извлеченного из реактора типа ВВЭР, содержится 905...980 кг урана (уран-235 и уран-238), 5...10 кг плутония, 1,2...1,3 кг цезия-137, около 0,7 кг технеция-99, 0,5 кг стронция-90, 0,5 кг нептуния-237 и другие изотопы.

Бурное развитие репроцессинга потребует увеличения кадрового персонала в атомной отрасли и смежных отраслях промышленности и увеличит спрос на высококвалифицированный персонал. При условии тщательного соблюдения техники безопасности и технологии обеспечения радиационной безопасности результатом программы будет снижение уровня радиации и сокращение опасности радиационного загрязнения [4].

Представленные результаты анализа инновационных возможностей технологий управления энергоресурсами, обеспечивающих их рациональное использование и регенерацию энергоресурсов, свидетельствуют о целесообразности их внедрения в различные сферы жизнедеятельности общества, включая военную. Это внедрение позволит обеспечить стопроцентную автономность систем специального назначения и критически важных объектов при выполнении ими задач по предназначению.

Список использованных источников

1. Проблемная статья группы энергосбережение «Инновационная энергетика как ресурс развития». http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=208
2. Богданов, А. Б. Национальные показатели энергоэффективности России / А. Б. Богданов. – <http://energosber.info/articles/technologies-sub/65435/>
3. Малая энергетика России. – <http://aenergy.ru/358>
4. Л. Ливайский. По материалам ЦЭНЭФ «Энергоэффективность и энергосбережение – ключевая отрасль экономического роста РФ». http://www.equipnet.ru/articles/power-industry/power-industry_405.html

И. А. Елизаров¹, К. С. Василевский¹, К. Ю. Иржавцев², С. С. Толстошеин²
(¹ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, Россия;
² ООО «Системы моделирования», Тамбов, Россия)

БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ХРАНЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Аннотация. Рассмотрено применение беспроводной технологии в системах мониторинга параметров хранения зерновых культур.

I. A. Elizarov¹, K. S. Vasilevsky¹, K. Yu. Irzhavtsev², S. S. Tolstoshein²
(¹ Tambov State Technical University, Tambov, Russia;
² LLC “Systems Modeling”, Tambov, Russia)

WIRELESS TECHNOLOGIES IN THE MONITORING SYSTEM CEREAL STORAGE

Abstract. The application of wireless technology in monitoring systems for storage parameters of crops is considered.

В век информационных технологий и глобальной цифровизации особое распространение получила так называемый технология «Интернет вещей» или IoT (Internet of things). Данная технология в своей основе имеет беспроводной стандарт передачи данных, отличительной технической особенностью которого является ультранизкое энергопотребление и большая дальность действия, по сравнению с существующими радиосетями.

Что касается реализации такой технологии, то наибольшее распространение получили компактные автономные измерительные и управляющие модули различной функциональности: преобразователи температуры, давления, влажности, наличия напряжения; релейные модули и т.д.

К сожалению, пока данная технология не получила масштабного распространения на производстве, однако постепенно нарастающими темпами система находит применение в автоматизированных системах технического учета энергоресурсов (электроэнергия, вода, газ и пр.).

Из-за своей универсальности и гибкости у данной системы существует серьезный потенциал применения в сельскохозяйственной отрасли, во вспомогательных технологических процессах химической, нефтехимической, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности.

Стандарт передачи данных LPWAN (Low-power Wide-area Network) – новый тип беспроводных сетей, разработанный специально для передачи данных телеметрии различных устройств на условно дальние расстояния. Главным условием при этом является небольшой объем передаваемой информации, а также отсутствие необходимости в большой скорости передачи. По принципу работы LPWAN схож с сетями сотовой связи: в данном случае также применяется топология сети «звезда», где каждое конечное (Endnode) устройство передает «напрямую» данные по радиоканалу на базовую станцию, осуществляющую прием радиосигнала, первичную обработку и «оцифровку» данных. Приняв и обработав сигналы с конечных устройств, базовая станция (БС) передает данные на сервер по доступному каналу связи: Ethernet, 3G/4G/GPRS, Wi-Fi и др. Сервер осуществляет конечную обработку данных, производит их архивирование и предоставляет данные пользователю, например через WEB-личный кабинет. Типовая архитектура сети представлена на рис. 1.

Беспроводные конечные устройства в сетях LPWAN представляют собой аналоговые или дискретные измерительные и управляющие модули, совмещенные с радиопередающей аппаратурой – модемом, осуществляющим передачу данных по радиосети до базовой станции. Так же конечным устройством может быть так называемое устройство сопряжения, лишенное какого-либо измерительного модуля. Данные устройства по сути являются шлюзами интерфейсов, «перекладывая» на радиосеть такие распространенные интерфейсы, как RS-485, RS-232, Ethernet и др.

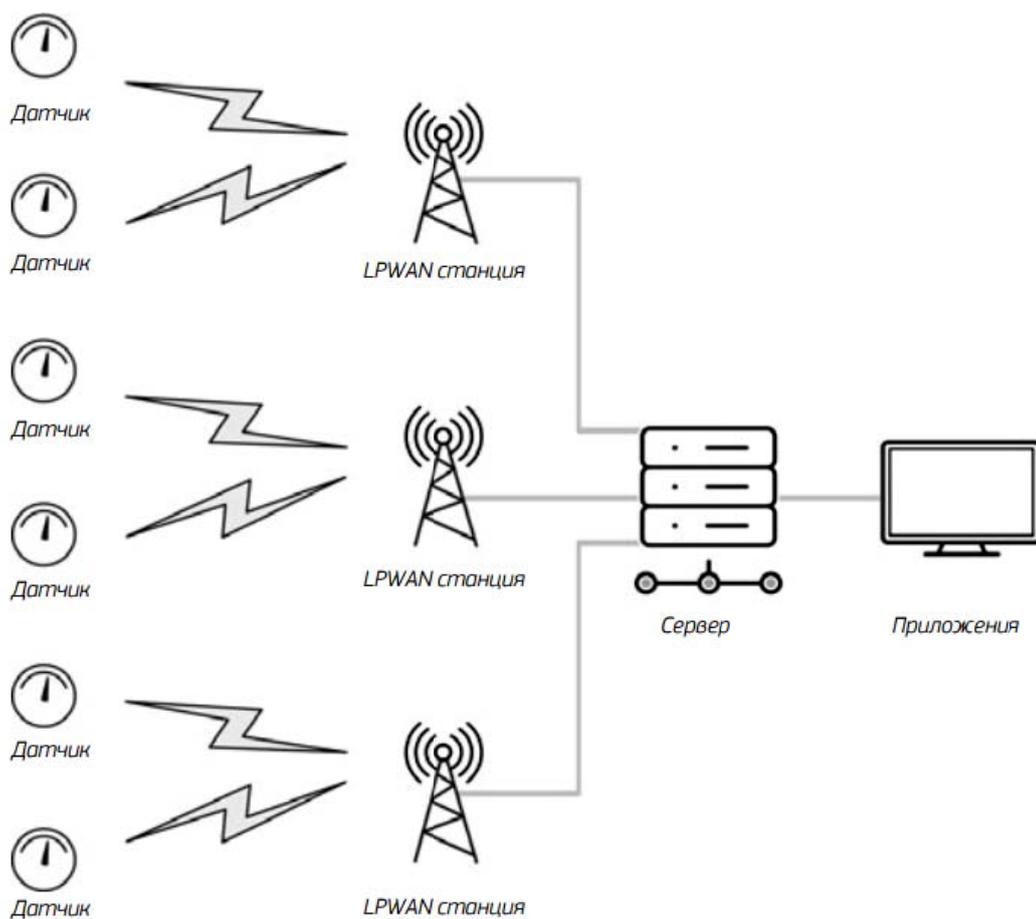


Рис. 1. Архитектура сетей LPWAN

Основное отличие данных модулей от классических состоит в том, что устройство большую часть времени находится в режиме «сна», т.е. в режиме крайне низкого энергопотребления. В момент времени, когда необходима передача данных, устройство активируется, совершает передачу данных, т.е. отправляет информацию на базовую станцию, и снова «засыпает». Наряду с измеренной информацией передаче подлежат такие сервисные параметры, как заряд батареи, номер устройства, дата измерения и др.

Применение данной беспроводной технологии находит свое применение в системах технического учета энергоресурсов, мониторинга трубопроводов, обнаружения лесных пожаров. Данное решение позволяет централизованно в автоматическом режиме осуществлять сбор, обработку и консолидацию данных с теплосчетчиков, счетчиков электроэнергии и других приборов технологических участков, цехов, отделов. Применение данной системы позволит упростить учет ресурсов, а также позволит оперативно и точно собирать информацию.

Особую значимость внедрение данной технологии имеет в сельскохозяйственной отрасли. В силу отсутствия физической коммуникационной инфраструктуры в сельской местности создает дополнительные ограничения при реализации проектов в сельском хозяйстве [1]. Использование беспроводных тех-

нологий с автономными источниками питания позволяет в значительной мере снять эти ограничения и обеспечить решения различных задач (например, мониторинг климатических условий, автоматизация теплиц, хранение сырья и т.д.).

Большинство зернохранилищ не имеют системы мониторинга качественных показателей хранения зерна, а также специализированного оборудования и технологических узлов, обеспечивающих необходимую рециркуляцию воздуха в объеме хранящегося зерна. Внедрение системы мониторинга хранения зерновых культур обеспечит сбор, обработку и передачу информации о процессе в целях предотвращения возникновения процессов прения, гниения, прорастания и заражения грибком.

Разрабатываемая система мониторинга включает комплекс технических и программных средств, которые обеспечивают выполнение следующих функций:

1. Сбор информации о температуре зерна.

Сбор информации о температуре зерна осуществляют погружные беспроводные датчики температуры, которые равномерно распределены по всему объему сырья.

2. Сбор информации о температуре и влажности воздуха внутри зернохранилища.

В качестве измерителя показателей температуры и влажности воздуха внутри зернохранилища используются общепромышленные датчики влажности и температуры, осуществляющие передачу информации по цифровому каналу передачи данных с использованием стандартных протоколов.

3. Автоматический сбор и передача данных на автоматизированное рабочее место оператора.

Сбор данных с датчиков температуры осуществляет базовая станция с мачтой и антенной, которая обеспечивает покрытие сетью LoRaWAN территорию зернохранилища: обработка поступающих данных, визуализация, составление отчетности, хранение архивов показаний в базе данных на едином сервере с установленным специализированным программным обеспечением. Считывание и передача показаний на сервер раз в час.

Применение системы мониторинга хранения зерновых культур позволит существенно сократить производственные издержки за счет уменьшения объема забракованного зерна.

Список использованных источников

1. Применение технологии LORA в интенсивном садоводстве / М. Н. Краснянский, И. А. Елизаров, А. А. Третьяков, Д. Ю. Муромцев, А. А. Завражнов // Цифровизация агропромышленного комплекса : сб. науч. ст. – 2018. – С. 16 – 18.

Н. Г. Беляев, И. А. Елизаров, В. Н. Назаров, А. А. Третьяков
(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия)

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС «УМНЫЙ САД»

Аннотация. Рассматривается состав и назначение элементов автоматизированного комплекса «Умный сад», предназначенного для отработки программно-технических решений по построению интеллектуальной системы управления объектами интенсивного сада.

N. G. Belyaev, I. A. Elizarov, V. N. Nazarov, A. A. Tretyakov
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

AUTOMATED TESTING COMPLEX “SMART GARDEN”

Abstract. The paper considers the composition and purpose of the elements of the automated complex “Smart garden”, designed for testing software and hardware solutions for the construction of an intelligent control system for objects of intensive garden.

Как показывают современные исследования, сегодня обеспечение населения страны плодово-ягодной продукцией в свежем и переработанном виде недостаточно развито. По данным Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, дефицит потребления такой продукции составляет 68 процентов от суточной нормы [1].

Наши граждане недополучают свежих фруктов и ягод, способных повысить адаптационный потенциал к различным стрессовым воздействиям окружающей среды. Как следствие, люди не получают важнейшие пищевые вещества, микро- и макроэлементы, что сказывается на уровне здоровья, качестве и продолжительности жизни населения в целом. В связи с этим роль отечественного садоводства существенно возрастает.

Будущее садоводства – в создании более эффективных систем воздействия на растения, системы точного земледелия, позволяющих применить персонализированный подход к насаждениям.

Умный сад – концепция построения интеллектуальной системы подготовки, контроля и управления всеми технологическими операциями выращивания садоводческой продукции с применением современных информационных технологий, технических средств, методов математического моделирования, методик создания экспертных систем. Такая система позволяет анализировать почвенно-климатические условия на основе больших данных, осуществлять интеллектуальное внесение органических и минеральных удобрений, проводить профилактические мероприятия по борьбе с вредителями и болезнями, а также проводить экономические расчеты рентабельности.

На кафедре «Информационные процессы и управление» Тамбовского государственного технического университета создан автоматизированный испытательный комплекс «УМНЫЙ САД» в целях отработки программно-технических решений по построению интеллектуальной системы управления объектами интенсивного сада.

Интеллектуальная система мониторинга и управления строится по модульному принципу и включает:

- распределенные по территории сада подсистемы сбора данных о состоянии почвы (влажности, температуры, водного потенциала почвы и его засоленности);
- климатические подсистемы (температуры и влажности воздуха, уровня освещенности, скорости ветра, количества осадков);
- станции фитомониторинга, осуществляющие измерение параметров дерева (толщина ствола, размер плода);
- базовую станцию с резервируемым источником питания (АКБ с солнечной батареей);
- исполнительную подсистему, отвечающую за управление капельным поливом и внесением удобрений;
- автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора-технолога или агронома с интегрированной системой поддержки принятия решений.

Кроме этого, интеллектуальная система управления обладает дополнительными возможностями [2]:

- SMS-уведомление: при возникновении внештатных ситуаций по техническим или технологическим причинам система управления в автоматическом режиме осуществляет SMS-оповещение работникам соответствующих служб. Это существенно повышает оперативность реагирования на внештатные ситуации.
- Подключение к облачному сервису через проводной или беспроводной Internet. Использование облачных технологий наделяет систему мониторинга и управления возможностью дистанционного доступа к системе из любой точки, где есть доступ в сеть Internet. Пользователь осуществляет доступ к облачному сервису с помощью web-интерфейса с любого компьютера или планшета.

Современное промышленное садоводство характеризуется тем, что сады располагаются на достаточно больших территориях. Для сбора информации с большого количества территориально распределенных датчиков рационально использовать беспроводные каналы связи. При этом крайне желательно, чтобы датчики имели автономное питание и работали бы без замены питания несколько лет.

В последние 20 лет возникло множество беспроводных стандартов и сетей, отвечающих требованиям постоянно растущего объема передачи данных между людьми – GSM, GPRS, 3G, LTE, Wi-Max, Wi-Fi, ZegBee, LPWAN (рис. 1).



Рис. 1. Технологии беспроводной связи

Одной из самых распространенных LPWAN-сетей в мире являются сети на базе технологии LoRa – сети LoRaWAN. Именно эта технология была выбрана в качестве основной коммутационной технологии в пилотном проекте «Умный сад».

Выбор технологии LoRa для использования в системе управления обусловлен ее уникальными особенностями:

- Большая дальность передачи радиосигнала по сравнению с другими беспроводными технологиями.
- Очень низкое электропотребление.
- Хорошая защита данных.

На рисунке 2 представлены модули подсистемы сбора данных о влажности и температуре почвы, а также температуре в кроне у подножья дерева (рис. 2, а) и климатической подсистемы (рис. 2, б), измеряющей температуру и влажность окружающего воздуха.



а)



б)

Рис. 2. Модули подсистемы сбора данных о состоянии почвы и окружающего воздуха

При выборе оборудования, поддерживающего технологию LoRa, для построения системы управления «Умный сад» было отдано предпочтение продукции отечественного производителя – компании «Вега-Абсолют», г. Новосибирск. Для измерения температуры воздуха у поверхности почвы и в кроне дерева используется датчик температуры с LoRaWAN-протоколом – ТД-11; для измерения влажности почвы использовались датчики с выходным сигналом 4...20 мА, которые подключались к LoRaWAN-конвертеру ТП-11. Устройство ТП-11 помимо передачи в сеть LoRaWAN сигналов датчиков с интерфейсом 4...20 мА имеет также два дискретных выхода типа «открытый коллектор» и может использоваться в качестве устройства управления. Кроме того, устройство имеет два охранных входа. Для измерения влажности окружающего воздуха также использовались датчики с выходным сигналом 4...20 мА – конвертер ТП-11.

Вся информация от датчиков поступает по радиоканалу LoRa на базовую станцию (рис. 3, а). Базовая станция БС-2 предназначена для разворачивания сети LoRaWAN на частотах диапазона 863...870 МГц. Питание базовой станции и сообщение с сервером осуществляется через канал Ethernet. Кроме того, сообщение с сервером может осуществляться через канал 3G.



а)



б)

Рис. 3. Базовая станция БС-2 и модуль бесперебойного питания (а), исполнительная подсистема капельного полива (б)

Исполнительная подсистема капельного полива и внесения удобрений (рис. 3, б) построена на базе отечественного промышленного контроллера ПЛК-100 компании ОВЕН. Исполнительная подсистема может функционировать в режиме автономного управления или в режиме автоматического управления.

В режиме автономного управления оператор имеет возможность задавать программы полива и внесения удобрений непосредственно с сенсорной панели

оператора, установленной в щите управления. В автоматическом режиме – контроллер реализует программы управления, формируемые на верхнем уровне управления – на АРМ оператора.

Автоматизированное рабочее место оператора-технолога (рис. 4) построено на базе отечественной SCADA-системы «КРУГ-2000». АРМ оператора осуществляет:

- прием от базовой станции информации от всех удаленных распределенных датчиков подсистем сбора данных о состоянии почвы, климатических подсистем, станций фитомониторинга, управляющего контроллера исполнительной системы капельного полива;
- обработку, архивирование, визуализацию полученной информации в удобном для оператора виде;
- автоматическую генерацию сигналов тревоги при возникновении каких-либо нештатных ситуаций с возможной отправкой SMS заинтересованным лицам;

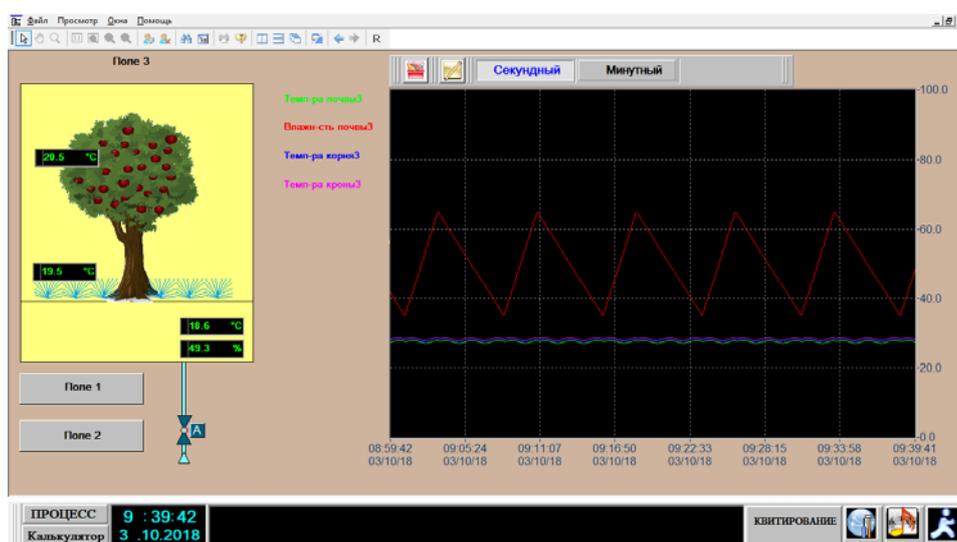
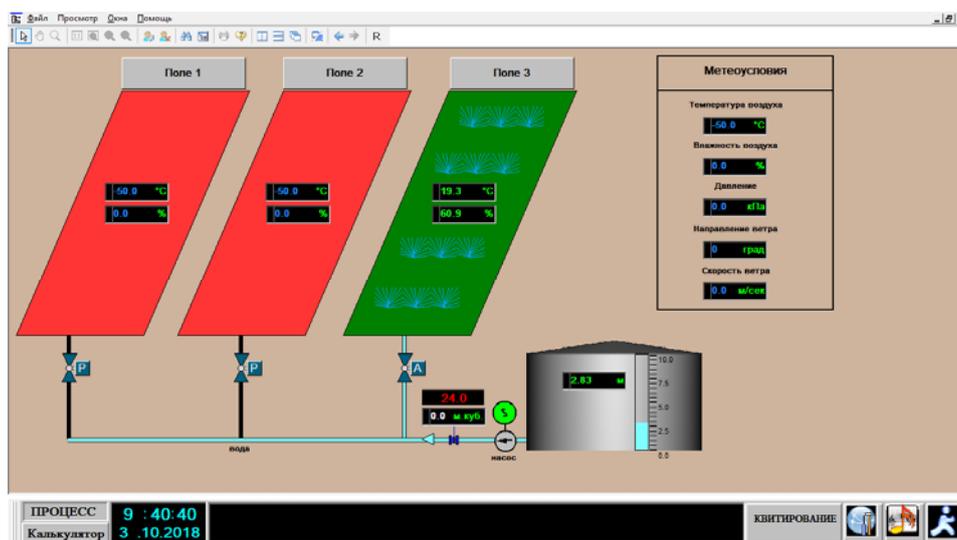


Рис. 4. Видеокадры АРМ оператора

- протоколирование всех действий человека-оператора;
- выдачу рекомендаций оператору по осуществлению капельного орошения, внесения удобрений и выполнению других мероприятий.

Список использованных источников

1. Будущее отечественного садоводства – в интеграции науки и бизнеса [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.michpravda.ru/articles/23483-budushchee-otechestvennogo-sadovodstva-v-integracii-nauki-i-biznesa>
2. Интеллектуальная система управления процессами ирригации и фертигации в интенсивном садоводстве / И. А. Елизаров, В. Н. Назаров, А. А. Третьяков, А. И. Завражнов // В сборнике: Импортозамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья : материалы I Всерос. конф. с междунар. участием. – 2019. – С. 498 – 501.
3. Применение технологии LORA в интенсивном садоводстве / М. Н. Краснянский, И. А. Елизаров, А. А. Третьяков, Д. Ю. Муромцев, А. А. Завражнов // Цифровизация агропромышленного комплекса : сб. науч. ст. – 2018. – С. 16 – 18.

М. А. Заводчиков, Е. А. Кискин, В. В. Алексеев, Е. В. Емельянов
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ,
Тамбов, Россия)

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕМ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация. В статье рассматривается применение дугогасящих реакторов и микропроцессорного устройства защиты отходящих присоединений при наиболее частых видах повреждения в электрических сетях – однофазных замыканиях на землю.

M. A. Zavodchikov, E. A. Kiskin, V. V. Alekseev, E. V. Emelyanov
(Interspecies Center of Training and Combat Use of Electronic Warfare Troops
(Training and Testing), Tambov, Russia)

APPROACH TO BUILDING AUTOMATED ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS FOR CRITICALLY IMPORTANT OBJECTS WITH MICROPROCESSOR-BASED MEANS

Abstract. The article discusses advantages of the application of arc suppression reactors and a microprocessor device to protect power lines from the most common types of damage in electrical networks – single-phase earth faults.

В любой стране в основе развития и процветания лежит электроэнергетика, обеспечивающая постоянную и бесперебойную работу промышленности, транспортной системы, сельского хозяйства, коммунальных служб. Непрерывно развивающаяся электроэнергетика страны обеспечивает ее экономическую стабильность.

Сегодня вместо традиционных электромеханических и аналоговых микроэлектронных защит, как мы видим, активно внедряются современные цифровые устройства. Используя микропроцессорные защиты, возникает возможность построения автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) и интегрирования их в АСУ ТП верхнего уровня. В сегодняшние дни вновь строящиеся и реконструируемые объекты электроэнергетики все чаще комплектуются микропроцессорными устройствами защиты и автоматики. Многофункциональность – вот основное преимущество микропроцессорных терминалов над аналоговыми защитами. Главная функция – защита электрооборудования и работа автоматики. Но кроме этого терминалы постоянно производят замеры электрических величин, следовательно, нет необходимости в установке дополнительных приборов для измерения. Здесь нужно выделить еще одно весомое преимущество – высокую точность измерений. Аналоговые приборы измеряют величины с некоторой погрешностью, а если приборы прослужили достаточно длительное время (а в таком состоянии находится огромное количество измерительных приборов), их точность ухудшается, да и фиксировать показания не всегда представляется удобным.

Применение микропроцессорных устройств защиты позволяет быстро и качественно фиксировать возникновение неисправностей. Возникающие отклонения от нормальных режимов работы оборудования, в том числе и аварийные ситуации, терминал фиксирует свечением светодиодов, которые сигнализируют о том или ином событии.

Характерным примером использования современных микропроцессорных защит является решение для релейной защиты для определения наличия однофазного замыкания на землю на секциях шин подстанции 10 кВ, а также индикации конкретного присоединения с однофазным замыканием на землю.

Рассмотрим особенности защиты от замыканий на землю (ОЗЗ) с компенсированной нейтралью.

Защита от ОЗЗ в сетях 6...35 кВ может выполняться в виде: селективной защиты, действующей на отключение поврежденного присоединения (когда это необходимо по требованиям безопасности); селективной защиты, действующей на сигнал; устройства контроля изоляции.

В сетях 20...35 кВ защита от однофазных замыканий на землю выполняется, как правило, с действием на сигнал.

В сетях с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, рекомендуется применять устройства сигнализации замыканий на землю, реагирующие

на сумму высших гармоник в токе замыкания на землю. Таким устройством является «Сириус-ОЗЗ» [5].

При построении защиты (или сигнализации) от ОЗЗ, в зависимости от режима работы нейтрали, используются принципы контроля (измерения) следующих параметров: тока нулевой последовательности (НП) промышленной частоты, напряжения НП, мощности НП промышленной частоты, гармонических составляющих в токе ОЗЗ всех присоединений, переходных токов и напряжений НП при возникновении ОЗЗ. Во всех этих случаях в защитах от ОЗЗ воздействующий сигнал получается от первичных измерительных преобразователей, в качестве которых выступает фильтр напряжения НП (ФННП) и фильтр тока НП (ФТНП).

Рассмотрим средства компенсации емкостного тока замыкания на землю. Подавляющее большинство нарушений нормальной работы сетей с изолированной нейтралью связано с повреждением изоляции относительно земли, т.е. с однофазным замыканием на землю. Установившееся значение тока в месте повреждения определяется емкостью фаз на землю. Для обеспечения максимально возможной надежности работы сети необходимо, чтобы ток замыкания был настолько мал, чтобы в течение достаточно длительного времени (времени, необходимого для поиска и устранения повреждения) можно было бы обойтись без отключения потребителей.

Согласно п. 5.11.8 ПТЭ, компенсация емкостного тока замыкания на землю должна применяться при следующих значениях тока: в сетях 6...20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ – более 10 А; в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор на воздушных линиях электропередачи: при напряжении 6 кВ – более 30 А; при напряжении 10 кВ – более 20 А; при напряжении 15...20 кВ – более 15 А; в схемах генераторного напряжения 6...20 кВ блоков генератор-трансформатор – более 5 А.

Суть компенсации емкостных токов в сетях 6...35 кВ заключается в снижении токов однофазного замыкания на землю. Это мероприятие сопровождается рядом положительных факторов, связанных с работой сети: происходит самопроизвольное погасание дуги, улучшаются условия электробезопасности, снижается кратность перенапряжений и др.

В силу изменения конфигурации электрической сети в процессе эксплуатации, в результате плановых или аварийных переключений происходит изменение величины емкости сети. В результате чего нарушается резонансная настройка дугогасящего реактора (ДГР). Поэтому для точной настройки дугогасящего реактора необходимо использовать плавно-регулируемые дугогасящие реакторы с автоматическими регуляторами [2].

На основании анализа И. А. Миронова, представленного в работе [1], все применяемые принципы настройки автоматических регуляторов для компенса-

ции емкостного тока замыкания на землю можно сгруппировать по следующим категориям: использование фазовых характеристик контура нулевой последовательности; использование амплитудных характеристик контура нулевой последовательности сети; использование напряжения не промышленной частоты; использование частоты свободных колебаний на нейтрали сети.

Обратимся последовательно к каждой категории типа регулирования.

В основе первых двух категорий лежит определение параметров контура нулевой последовательности данной сети.

В случае несимметрии сети ($Y_{aa} \neq Y_{bb} \neq Y_{cc}$) получаем U_N ненулевое напряжение на нейтрали (смещение нейтрали) даже при уравновешенной системе ЭДС и соблюдении условия баланса фаз $\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 0$:

$$U_N = \frac{\dot{E}_a \times Y_{aa} + \dot{E}_b \times Y_{bb} + \dot{E}_c \times Y_{cc}}{Y_{bb} + Y_{bb} + Y_{cc}}.$$

Это напряжение сети имеет случайные значения модуля и фазы.

Пренебрегая активной составляющей проводимости и вводя в одну из фаз дополнительную емкость C_D , получаем напряжение на нейтрали

$$U_{N\partial} = \frac{\dot{E}_a \times C_a + \dot{E}_b \times C_b + \dot{E}_c \times C_c + \dot{E}_c \times C_D}{C_a + C_b + C_c + C_D}.$$

Зная величину емкости C_D и измерив напряжение $U_{N\partial}$ трансформатором напряжения с обмоткой «разомкнутый треугольник», можно определить емкость сети

$$U_{N\partial} = -\dot{E}_c \times \frac{C_D}{3C + C_D}.$$

Дополнительное напряжение несимметрии не остается неизменным по модулю, так как в процессе эксплуатации сети суммарная емкость фаз может изменяться в довольно широких пределах. Фаза же этого напряжения постоянна, так как оно равно напряжению одной из фаз, умноженному на вещественное число $\frac{C_D}{3C + C_D}$.

Для устранения влияния случайного напряжения несимметрии с помощью фильтрации по частоте автором в работе предлагается усовершенствованный метод автоматической настройки режима заземления нейтрали на основе наложения токов не промышленной частоты.

Источник не промышленной частоты по своим параметрам должен быть приближен к идеальному источнику ЭДС или к идеальному источнику тока. По отношению к токам и напряжениям, создаваемым этим вспомогательным источником, могут быть применены практически все известные методы фиксации или измерения расстройки компенсации.

При использовании фазового метода и достижении условия, когда угол между током дугогасящего реактора и напряжением вспомогательного источника равен нулю, фактическая расстройка компенсации будет отличаться от нуля из-за отличия частот. Оценку ошибки, которая при этом имеет место, можно сделать, выразив расстройку компенсации через собственную частоту контура нулевой последовательности при промышленной частоте и частоте вспомогательного источника:

$$v_{II} = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_{II}^2}; \quad v_{II} = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_{II}^2}.$$

Таким образом, снижение емкостного тока при замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью достигается применением дугогасящих реакторов на каждой секции шин низкого напряжения подстанции. Система автоматической компенсации емкостного тока замыкания на землю содержит регулируемый дугогасящий реактор и регулятор, выполненный в виде системы регулирования компенсации на базе аналоговой аппаратуры и аппаратуры управления и контроля. Система должна обеспечивать автоматическую настройку тока компенсации при изменении емкости сети. Представлен подход к решению для релейной защиты при определении наличия однофазного замыкания на землю на секциях шин подстанции, а также индикации конкретного присоединения с однофазным замыканием на землю на базе терминала «Сириус-ОЗЗ». В качестве средства компенсации рассмотрено применение дугогасящих реакторов для компенсации емкостных токов в сетях с изолированной нейтралью. Изучены особенности и принципы управления ДГР.

Список использованных источников

1. Миронов, И. А. Дугогасящие реакторы в сетях 6 – 35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока / И. А. Миронов // Новости Электротехники. – 2007. – № 3(45).
2. Березницкий, С. Л. Усовершенствование средств контроля и автоматической настройки режима заземления нейтрали в электрических сетях 6 – 10 кВ на основе наложения токов не промышленной частоты : дис. ... канд. техн. наук / С. Л. Березницкий. – Томск : Томский политехнический университет, 2000. – 208 с
3. РД 34.20.179. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6 – 35 кВ.
4. НТБЭ.105.001РЭ. Руководство по эксплуатации «Устройство автоматического регулирования токов компенсации типа УАРК-105». – 63 с.
5. Руководство по эксплуатации «Устройства определения присоединения с однофазным замыканием на землю «Сириус-ОЗЗ». – 43 с.
6. Сайт АО «РАДИУС Автоматика». – <http://www.rza.ru>

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ БОРЬБА

Д. А. Баранов, Р. А. Долбин, С. И. Немченко, А. С. Разнополов
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ,
Тамбов, Россия)

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ БОЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТЕЙ И ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ РЭБ

Аннотация. В статье рассматривается вопрос повышения эффективности работы командиров частей и подразделений РЭБ при проведении оперативно-тактических расчетов автоматизированным способом. Для реализации этого предлагается использовать специализированную вычислительную программу по проведению оперативно-тактических расчетов «КОНТУР».

D. A. Baranov, R. A. Dolbin, S. I. Nemchenko, A. S. Raznopolov
(Interspecies Center for Training and Combat Use of Electronic Warfare Troops
(Training and Testing), Tambov, Russia)

INFORMATIONAL AND ANALYTICAL SYSTEM FOR CONTROL AND PLANNING OF WARFARE USAGE OF RADIO-ELECTRONIC WARFARE TROOPS

Abstract. This article deals with improving of work efficiency of commanders of radio-electronic warfare troops due to automatisisation of operational-tactical calculations. As example of practical realization of this method a special operational-tactical calculating program called «КОНТУР» is used.

При планировании боевого применения сил и средств РЭБ-Н должностным лицам требуется проводить ряд оперативно-тактических расчетов. В сложной и быстроменяющейся оперативно-тактической и радиоэлектронной обстановках необходимо сократить время на их проведение. Решением данной проблемы является использование таких информационных систем, которые позволили бы автоматизировать вычислительные процессы. В настоящее время в ВС РФ широко используются различные средства автоматизации и специальное программное обеспечение.

Внедрение специализированной вычислительной программы по проведению оперативно-тактических расчетов «КОНТУР» позволит:

- упростить работу командира по сбору и обработке необходимых числовых и графических данных;
- сократить время на проведение необходимых вычислений;

- сократить время принятия решения на боевое применение сил и средств РЭБ;
- повысить эффективность работы командиров частей и подразделений РЭБ.

Специализированная вычислительная программа «КОНТУР» (рис. 1) позволяет быстро и качественно решать следующие оперативно-тактические задачи:

- расчет дальности подавления в КВ-диапазоне;
- расчет дальности подавления в УКВ-диапазоне;
- расчет времени совершения марша подразделением РЭБ;
- расчет оценки трассы радиорелейной связи;
- расчет напряженности электромагнитного поля в точке приема;
- расчет дальности обнаружения сигнала противника.

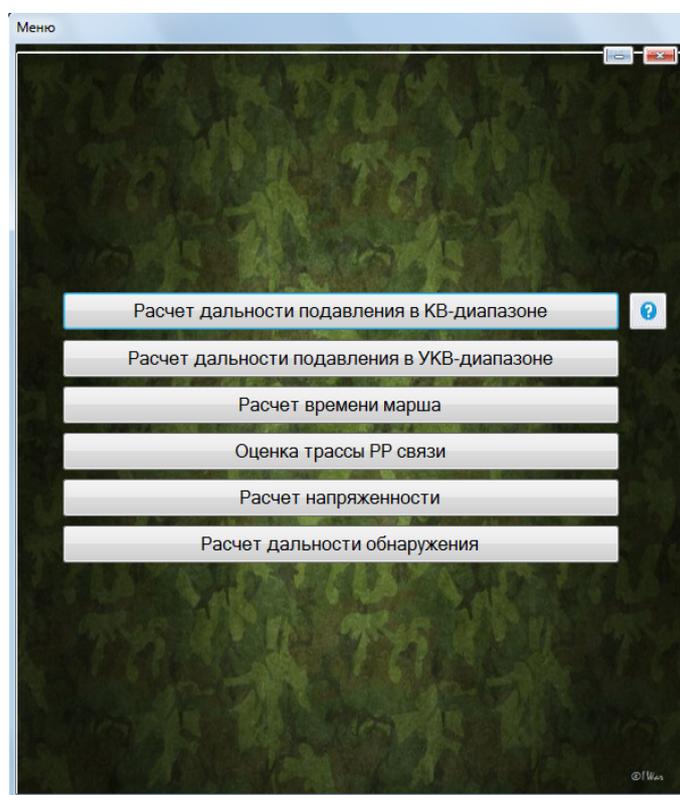


Рис. 1. Специализированная вычислительная программа по проведению оперативно-тактических расчетов «КОНТУР»

Специализированная вычислительная программа «КОНТУР» позволяет успешно решить данные оперативно-тактические задачи. Рассмотрим, на основе какого математического аппарата реализованы расчеты.

Под дальностью подавления в КВ-диапазоне понимают

$$D_{\Pi} = D_{\text{СВ}} \sqrt[4]{\frac{P_{\Pi} G_{\Pi}}{P_{\text{С}} G_{\text{С}} K_{\text{ПР}}}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{св}}$ – дистанция связи; $P_{\text{п}}$ – величина мощности помехи; $P_{\text{с}}$ – величина мощности полезного сигнала; $G_{\text{п}}$ – коэффициент усиления антенны станции помех; $G_{\text{с}}$ – коэффициент усиления антенны станции связи; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент подавления по мощности.

Дальность подавления в УКВ-диапазоне определяется как наименьшее значение между (1) и (2), а (2) определяется как

$$D_{\text{п}} = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (2)$$

где h_1 – высота поднятия антенны передатчика; h_2 – высота поднятия антенны приемника.

При расчете марша необходимо выбрать одну из трех возможных задач, количество участков (до пяти включительно), тип транспорта (т.е. среднюю скорость движения) и количество наименований техники (до семи включительно). Далее необходимо определить длины отрезков пути, дорожное покрытие и количество техники.

В оценке трассы радиорелейной связи учитывается принцип волновой оптики (Гюйгенса–Френеля) [1]. Для расчета оценки трассы радиорелейной связи требуется произвести ориентировочную оценку трассы путем сравнения полусуммы высот точек установки станций (с учетом высот антенн) с суммой наибольшей высоты, лежащей на трассе, и высоты дуги земной кривизны. Высота земной кривизны определяется как: $H = R^2/50$, где R – расстояние между станциями, км. Если величина полусуммы высот точек установки станций больше величины суммы наибольшей высоты, лежащей на трассе, и высоты дуги земной кривизны, то трасса является открытой, в противном случае трасса закрытая, и величина закрытия определяется превышением второй величины над первой. В случае закрытой трассы необходимо либо сменить место установки станции на более возвышенное, либо увеличить высоту антенны.

Действующее значение напряженности ЭМП сигнала в точке приема средства РР определяется выражением

$$E_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{30P_{\text{с}}G_{\text{с}}}}{D} W, \quad (3)$$

где D – расстояние между средством РР и разведываемым РЭС; $G_{\text{с}}$ – коэффициент усиления антенны средства радиосвязи, рассчитанный в направлении на средство РР; $P_{\text{с}}$ – мощность, подводимая к антенне передатчика системы связи; W – коэффициент (множитель ослабления), учитывающий пространственные характеристики среды распространения радиоволн.

В расчете напряженности проводится интерполяция графика зависимости множителя ослабления от тангенса угла потерь, что позволяет проводить расчет как в КВ-, так и в УКВ-диапазонах.

Дальность обнаружения (разведки) D_p – это дальность, на которой напряженность ЭМП в точке приема $E_{пр}$ равна чувствительности по полю E_0 средства РР. Дальность обнаружения (разведки) определяется на основе следующего выражения:

$$D_p = \frac{\sqrt{30P_c G_c}}{E_0} W. \quad (4)$$

В расчете дальности обнаружения использован итерационный метод решения (получение приближенного решения, а затем его уточнение) [2].

Для разработки специализированной вычислительной программы по проведению оперативно-тактических расчетов «КОНТУР» используется язык программирования C#.

Выбор обусловлен объектной ориентированностью данного языка, среда разработки – удобством в написании программного кода с базовыми знаниями.

Исходя из особенностей языка программирования C#, сформулируем основные преимущества данного языка:

- язык программирования C# претендует на подлинную объектную ориентированность;
- компонентно-ориентированный подход к программированию, способствующий меньшей машинно-архитектурной зависимости результирующего программного кода, гибкости, переносимости и легкости повторного использования (фрагментов) программ;
- ориентация на безопасность кода (в сравнении с C и C++);
- унифицированная система типизации;
- расширенная поддержка событийно-ориентированного программирования.

Таким образом, информационная система «КОНТУР» позволяет автоматизировать процесс проведения оперативно-тактических расчетов, что, во-первых, позволяет значительно сократить время проводимых расчетов должностными лицами, во-вторых, помочь им в принятии решений в сложных тактических обстановках, в-третьих, предоставить возможность быстрой подготовки специалистов средств РЭБ к проведению оперативно-тактических расчетов, а также усовершенствовать их навыки.

Список использованных источников

1. Калинин, А. И. Распространение радиоволн и работа радиолиний / А. И. Калинин, Е. Л. Черенькова. – М. : Связь, 1971. – 440 с.
2. Кубанов, В. П. Влияние окружающей среды на распространение радиоволн / В. П. Кубанов. – Самара : ПГУТИ, 2013. – 92 с.

Ю. В. Алферов, С. А. Мартиросов, А. В. Семенюк, А. А. Шнайдер
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ,
Тамбов, Россия)

ПОСТРОЕНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ПОСТАНОВКИ ПОМЕХ

Аннотация. В работе приводится реализация моделей генераторов хаотических колебаний в программной среде *Matlab* и блока управления для программно-аппаратного комплекса постановки помех.

Yu. V. Alferov, S. A. Martirosov, A. V. Semenyuk, A. A. Shnayder
(The Multiservice Training Center and Radio Electronic Warfare
Tactical Employment, Tambov, Russia)

CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION OF THE CONTROL UNIT OF THE CHAOTIC OSCILLATOR GENERATOR FOR INSTALLING INTERFERENCE

Abstract. The paper presents the implementation of chaotic oscillation generator models in the *Matlab* software environment and the control unit for a hardware-software complex for jamming.

Для создания программно-аппаратного комплекса постановки помех необходимо выбрать аппаратную платформу, позволяющую реализовать это. Программируемая логическая интегральная схема является устройством, позволяющим разработчикам устройств работать с данными больших объемов. Оно позволяет быстро их обрабатывать, в отличие от устройств, построенных на процессорах. Но прежде чем реализовать устройство на ПЛИС, разработчики моделируют свои проекты в различных пакетах компьютерного моделирования, одним из которых является пакет *Simulink*. В связи с этим производители пакета *Simulink* реализовали возможность преобразовывать модели в код *VHDL*. Данный способ в разы увеличивает скорость разработки программ для ПЛИС, так как позволяет инженерам не тратить время на написание кода вручную и время на отладку и поиск ошибок, которые возникают при этом [1].

Целью работы является реализация разработанных математических моделей генераторов хаотических колебаний Лоренца, Ресслера, Рикитаке и Нозе–Гувера в пакете *Simulink* программной среды *MATLAB* в качестве микропрограммы для блока управления генератора хаотических колебаний для постановки помех.

На рисунке 1 представлена модель одного из четырех генераторов хаотических колебаний – генератора Лоренца [2].

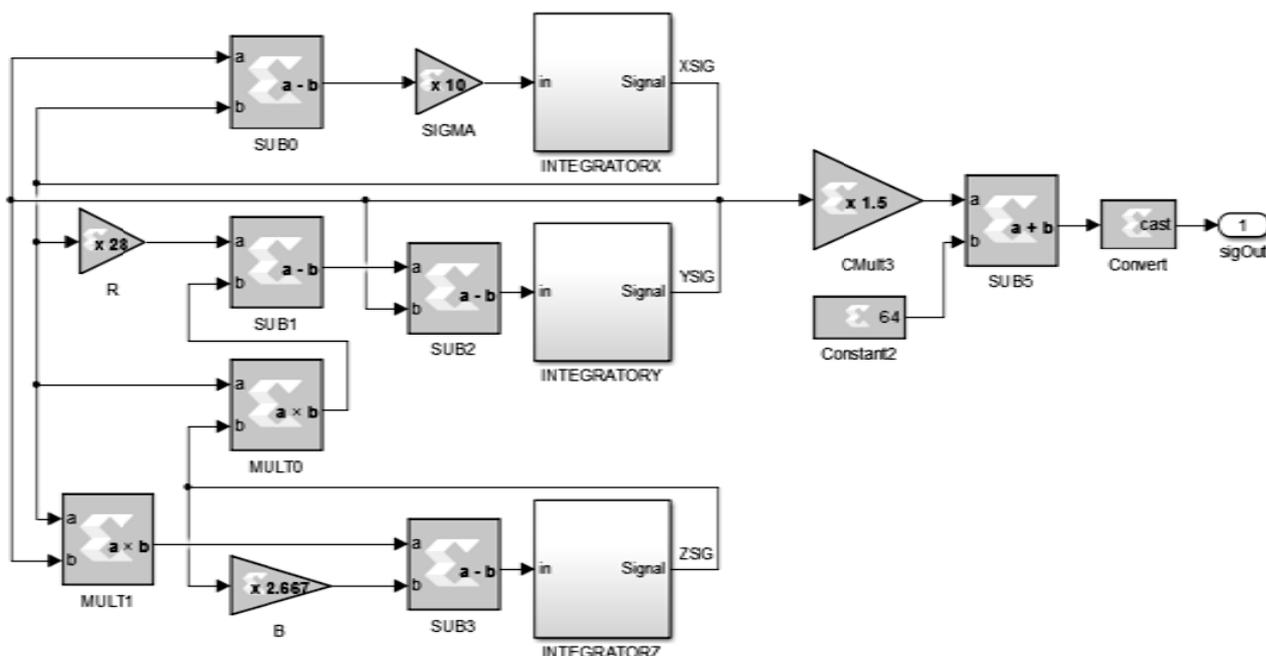


Рис. 1. Модель генератора Лоренца в программном пакете *Simulink*

Представленная модель состоит из набора математических операций. Внутри каждого узла математических операций необходимо указать разрядность промежуточных данных и их тип. Для корректной работы ПЛИС все операции производятся в формате с фиксированной точкой. В результате исследований были выбраны следующие форматы данных: 32-битный вектор знаковых чисел в формате с фиксированной точкой. Двенадцать бит отводится на целую часть и двадцать бит – на дробную часть.

На рисунке 2 представлен сигнал на выходе генератора хаотических колебаний Лоренца.

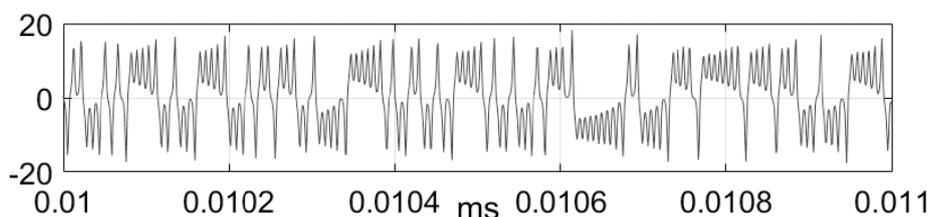


Рис. 2. Результат работы модели

Сигналы с выходов генераторов можно использовать в качестве широкополосной помехи. Однако для этого необходимо разработать и реализовать алгоритм синтеза итогового сигнала. Аппаратной основой для реализации данного блока управления будет выступать *ArduinoUno* [3].

В программно-аппаратном комплексе постановки помех было решено реализовать блок управления синтезатором сигналов в виде отдельного программно-аппаратного модуля. Данное решение позволяет избавиться от необ-

ходимости изменять микропрограмму ПЛИС при изменении параметров переключения генераторов и позволяет реализовать блок управления на любой удобной аппаратной платформе. В качестве аппаратной платформы была выбрана плата *ArduinoUno* на микроконтроллере *AtMega*.

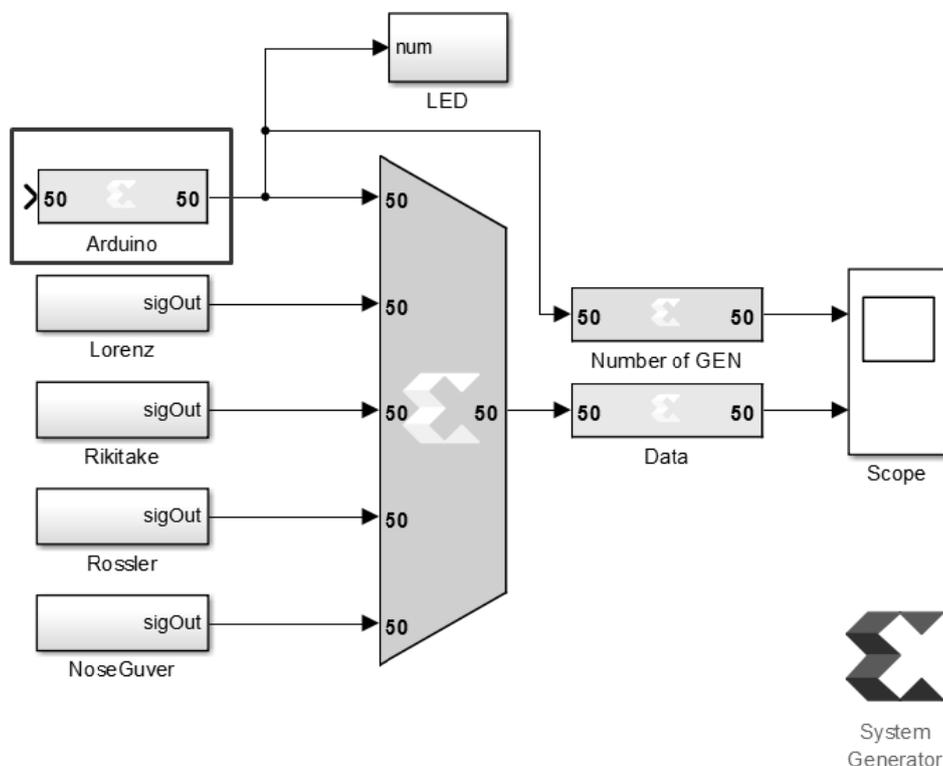


Рис. 3. Вход блока управления на модели микропрограммы в пакете *Simulink*

Блок управления работает по алгоритму, позволяющему формировать итоговый сигнал путем переключения между генераторами хаотических колебаний в случайной последовательности на случайные промежутки времени из заданного диапазона значений. Результат работы данного блока представлен на рис. 4.

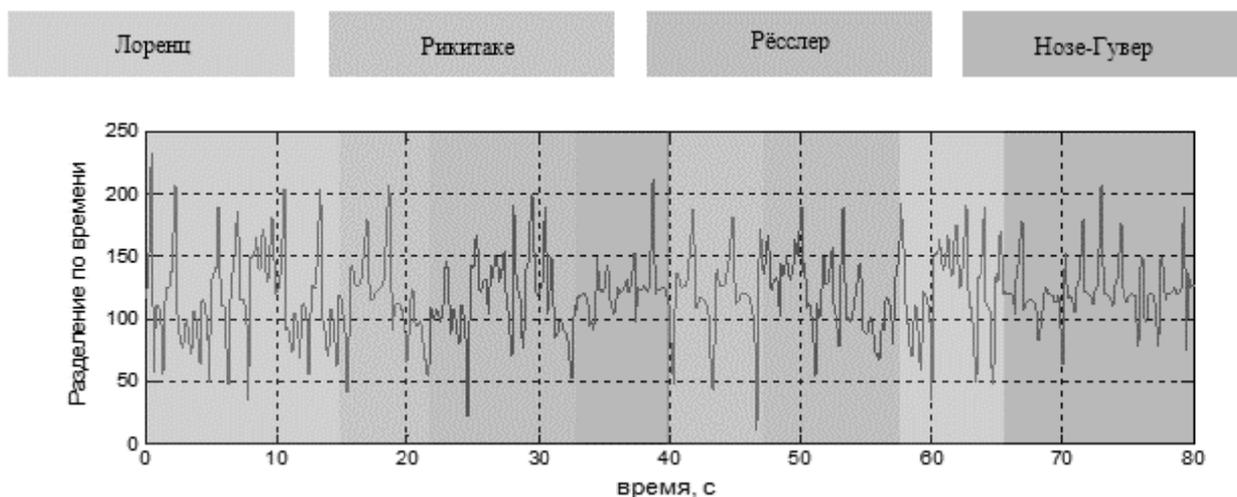


Рис. 4. Итоговый сигнал

В данной работе были реализованы разработанные математические модели генераторов хаотических колебаний Лоренца, Ресслера, Рикитаке и Нозе–Гувера в пакете *Simulink* программной среды *MATLAB* в качестве микропрограммы для блока управления генератора хаотических колебаний для постановки помех.

Список использованных источников

1. Потемкин, В. Г. Matlab 6: среда проектирования инженерных приложений / В. Г. Потемкин. – М. : Диалог-Мифи, 2003. – 202 с.
2. Рябов, И. В. Принципы программно-определяемых радиосистем и их применение в рамках задачи исследования метеорной радиосвязи / И. В. Рябов, С. В. Толмачев, А. А. Лебедева // Технические науки. – 2016. – № 7-1 – С. 59 – 66.
3. Улли, С. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino / С. Улли. – М.–СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 326 с.

Ю. В. Алферов, С. А. Мартиросов, А. В. Семенюк, А. А. Шнайдер
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ,
Тамбов, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ БЛОКИРОВАНИЯ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Аннотация. В работе приводится реализация модели хаотических колебаний для блокирования каналов управления беспилотными летательными аппаратами.

Yu. V. Alferov, S. A. Martirosov, A. V. Semenyuk, A. A. Shnayder
(The Multiservice Training Center and Radio Electronic Warfare
Tactical Employment, Tambov, Russia)

MODELING OF CHAOTIC OSCILLATIONS FOR BLOCKING CONTROL CHANNELS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Abstract. The paper provides an implementation of the chaotic oscillation model for blocking control channels of unmanned aerial vehicles.

Эффективное функционирование беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самостоятельно или в составе стаи БПЛА предполагает безопасное управление им при отсутствии оператора, который непрерывно им управляет. БПЛА – это сложный объект управления, на который возлагаются различные целевые задачи, такие как мониторинг оперативной обстановки конкретной территории, ретрансляция служебной информации по каналу связи и др.

Для обеспечения устойчивости управления БПЛА необходим своевременный анализ радиоэлектронной обстановки в зоне действия данного БПЛА. При этом необходимо обеспечить безопасную передачу управляющих данных. Для этого можно использовать генераторы хаотических колебаний.

Реальные случайные процессы обычно представляют собой непрерывную функцию, изменяющуюся во времени. Для математического моделирования таких процессов на ЭВМ целесообразно представлять их в виде последовательностей определенным образом организованных случайных чисел, следующих через определенный интервал времени, называемый интервалом дискретизации. Также возникает необходимость в переопределении вероятностных (статистических) характеристик случайных процессов, вследствие его представления последовательностью случайных чисел [1].

Применяя гипотезу эргодичности стационарных случайных процессов, заменим осреднение по времени осреднением по реализациям случайного процесса.

По определению автокорреляционная функция (АКФ) записывается в виде выражения

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)y(t + \tau)dt, \quad (1)$$

Статистические характеристики псевдослучайного процесса определяются так же, как для непрерывного процесса, но в формулах от интегрирования переходят к суммированию [2]. Для последовательности случайных чисел, образующих псевдослучайный процесс, можно рассчитать значения автокорреляционной функции такого процесса. Только теперь АКФ будет дискретной функцией, а не непрерывной:

$$R(i) = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^N Y(j)Y(j+i). \quad (2)$$

В данной работе для расчета значений последовательности случайных чисел (для синтеза псевдослучайного процесса с заданными статистическими характеристиками) используется формула

$$Y(n) = \frac{1}{m} \times \sum_{i=1}^m Y(n-i) + k \times z. \quad (3)$$

Проведем анализ формулы (3) на предмет влияния ее элементов на параметры АКФ.

Для того чтобы получить реализацию случайного процесса с заданной АКФ, необходимо задать некоторую связь нового значения случайного процесса с предыдущими. Так как при моделировании непрерывного случайного процесса на ЭВМ мы заменяем его последовательностью чисел, то необходимо рассчитывать каждый новый элемент последовательности, используя некоторое

количество предыдущих значений последовательности (эффект «памяти» случайного процесса, определяемого значением средневзвешенного числа предыдущих значений – m).

В математической модели псевдослучайного процесса усреднение m предыдущих значений формируемой последовательности производится в целях получения возможности варьирования значениями интервала корреляции АКФ, зависящего от m . Для каждого следующего интервала дискретизации к полученному значению добавляется случайное значение z , определяемое стандартным генератором случайных чисел с равномерным законом распределения вероятностей на отрезке $[-1, 1]$, увеличенное в k раз, для получения возможности изменения дисперсии случайного процесса [3].

В целях обеспечения стационарности случайного процесса при больших значениях N производится дополнительное преобразование рассчитанных значений $Y(n)$ в соответствии с алгоритмом расчета последовательности случайных чисел, блок-схема которого представлена на рис. 1.

В начале расчета вводятся необходимые параметры: T – длина выходной последовательности чисел (реализации случайного процесса), A – максимальное отклонение получаемых значений относительно среднего значения k и m – значения которых определяют корреляционную функцию. Далее в алгоритме производится определение начальных значений последовательности случайных чисел, задаваемых с помощью стандартного генератора случайных чисел RND .

Затем производится усреднение m предыдущих значений, и к получившемуся среднему прибавляется случайное число RND , умноженное на коэффициент k . Затем производится преобразование получившегося значения, которое обеспечивает формирование значений случайного процесса в интервале от $-A$ до A .

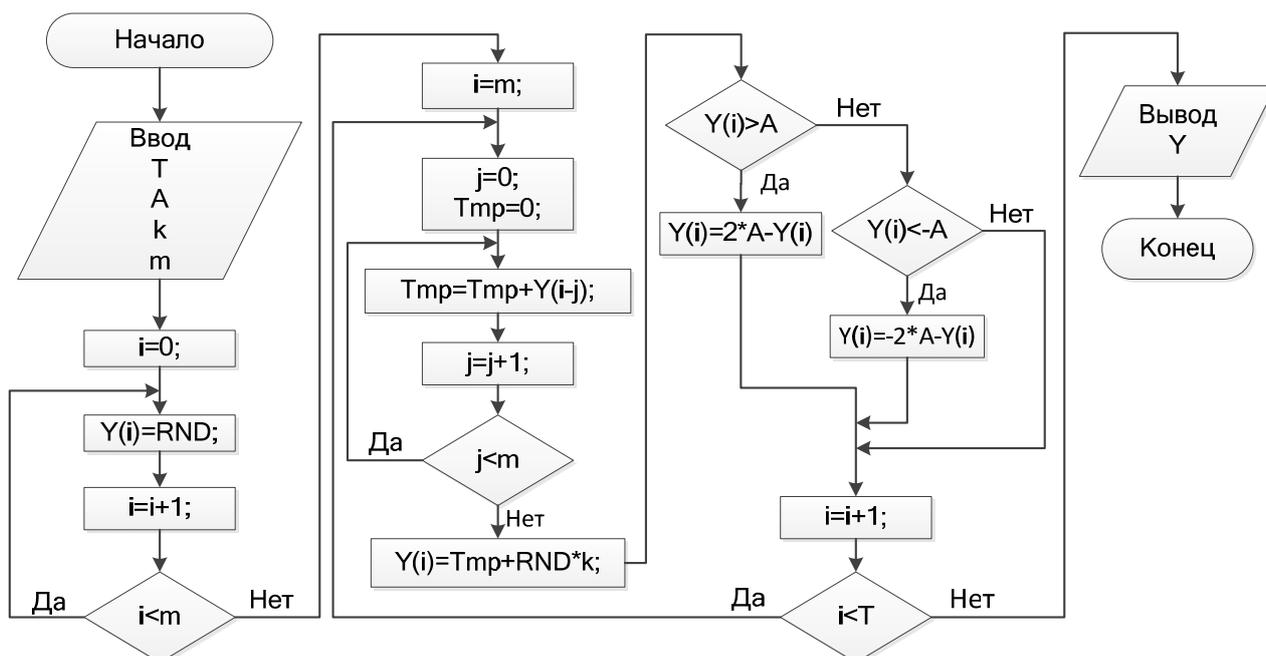


Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования случайного процесса с заданной АКФ

На рисунке 2 представлен пример реализации случайного процесса, смоделированного по разработанному алгоритму. При работе данного алгоритма получается псевдослучайный процесс с автокорреляционной функцией, вид которой зависит от параметров m и k .

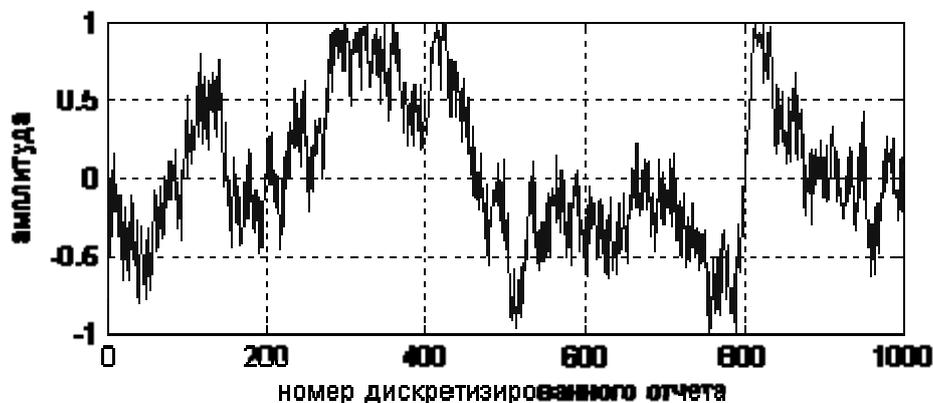


Рис. 2. Пример моделирования реализации случайного процесса

На рисунке 3 представлен пример расчета гистограммы – эмпирической функции плотности вероятности случайной величины, генерируемой процедурой *RND*, построенной по выборке из 10 000 данных. Полученная функция распределения достаточно хорошо совпадает с равномерным законом функции распределения вероятностей случайной величины.

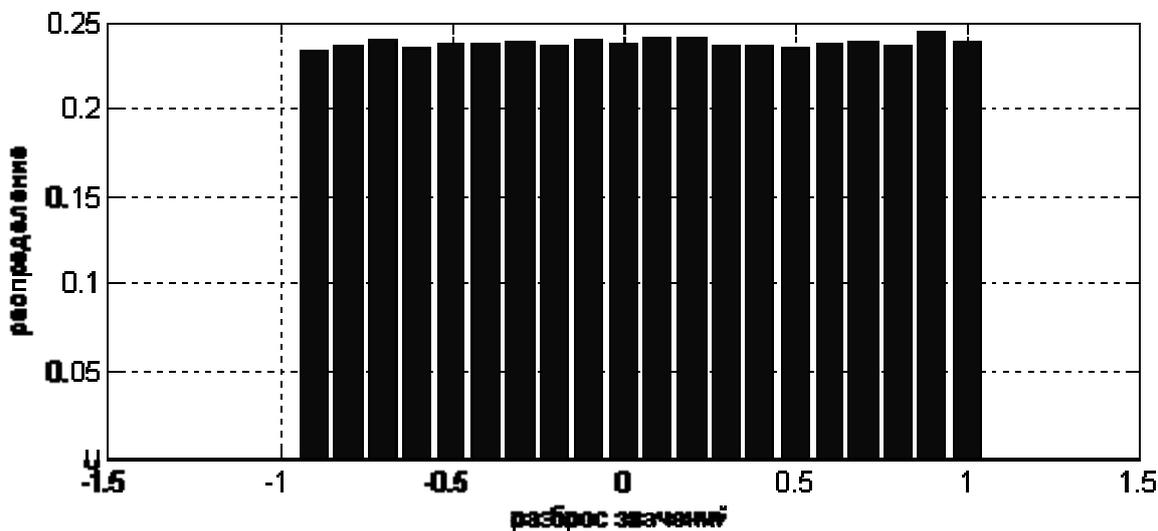


Рис. 3. Гистограмма получаемой последовательности случайных чисел

Для расчета автокорреляционной функции использовалась формула (2). На рисунке 4 представлен пример автокорреляционной функции сгенерированного псевдослучайного процесса для различных значений k .

В таблице 1 приведены экспериментальные данные, по которым построены графики зависимостей интервала корреляции от параметров модели k и m .

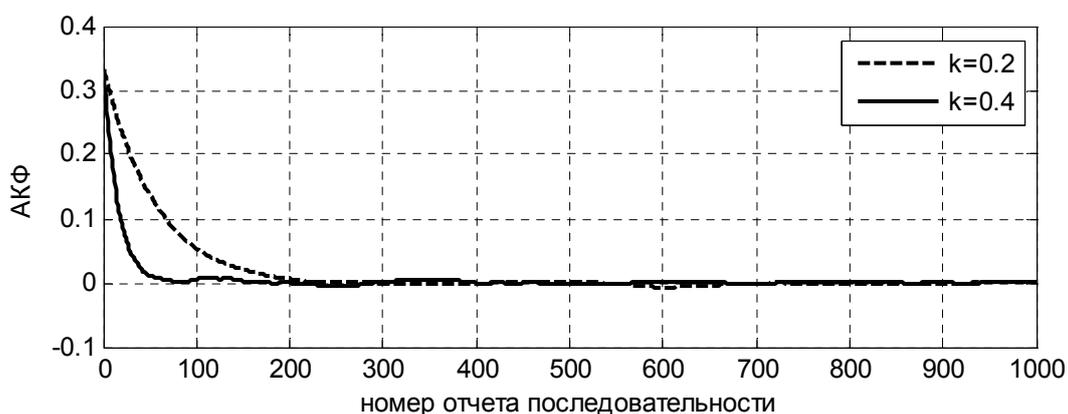


Рис. 4. Пример АКФ сгенерированного случайного процесса при различных значениях параметров математической модели

1. Зависимость интервала корреляции от параметров математической модели k и m

$m \backslash k$	2	3	4	5
0,2	170	280	530	720
0,3	75	135	230	310
0,4	45	75	115	160
0,5	28	44	70	110
0,6	20	30	45	64
0,7	13	21	31	43

Разработанная математическая модель случайного процесса позволяет получать реализацию случайного процесса с заданной автокорреляционной функцией со статистическими характеристиками, зависящими от задаваемых значений параметров A , k , m , T математической модели случайного процесса. Данную модель можно использовать для блокирования каналов управления беспилотного летающего аппарата.

Список использованных источников

1. Потемкин, В. Г. Matlab 6: среда проектирования инженерных приложений / В. Г. Потемкин. – М. : Диалог-Мифи, 2003. – 202 с.
2. Рябов, И. В. Принципы программно-определяемых радиосистем и их применение в рамках задачи исследования метеорной радиосвязи / И. В. Рябов, С. В. Толмачев, А. А. Лебедева // Технические науки. – 2016. – № 7-1. – С. 59 – 66.
3. Улли, С. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino / С. Улли. – М.–СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 326 с.

Ю. В. Алферов, С. А. Мартиросов, А. В. Семенюк, А. А. Шнайдер
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ,
Тамбов, Россия)

**ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ПОСТРОЕНИЯ ПОМЕХ ДЛЯ БЛОКИРОВАНИЯ КАНАЛОВ
УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ**

Аннотация. В работе приводится программно-аппаратная реализация динамического хаоса устанавливающего помехи для блокирования каналов управления робототехническими комплексами.

Yu. V. Alferov, S. A. Martirosov, A. V. Semenyuk, A. A. Shnayder
(The Multiservice Training Center and Radio Electronic Warfare
Tactical Employment, Tambov, Russia)

**INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM
OF CONSTRUCTION OF INTERFERENCE FOR BLOCKING
OF CHANNELS OF CONTROL OF ROBOTIC-COMPLEX COMPLEXES**

Abstract. The paper presents a hardware-software implementation of dynamic chaos that establishes interference for blocking control channels of robotic complexes.

Управление информационной безопасностью становится все более важным аспектом теории управления. Установка помех для блокирования каналов управления является одной из эффективных мер защиты информации, которая входит в комплекс мероприятий управления информационной безопасностью.

Динамический хаос – непериодические колебания, возникающие в нелинейных детерминированных системах, демонстрирующие высокую чувствительность к начальным условиям. Эти колебания имеют ряд общих черт со случайными процессами, в частности сплошной спектр мощности, но их природа связана не со случайностью, а с нелинейными свойствами, порождающими нерегулярные колебания в динамических системах. Так же динамический хаос является детерминированным, т.е. значение сигнала можно точно рассчитать для каждого момента времени [1].

Наиболее известной и исследованной нелинейной системой дифференциальных уравнений с хаотическими колебаниями является система Лоренца. Специалист по физике атмосферы Э. Н. Лоренц предложил простую модель тепловой конвекции в атмосфере. В общем случае тепловые процессы описываются уравнениями теплопроводности. Лоренц сделал ряд допущений и получил трехмерную модель тепловой конвекции в обыкновенных дифференциальных уравнениях

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x), \\ \dot{y} = x(b - z) - y, \\ \dot{z} = xy - cz. \end{cases} \quad (1)$$

Параметры a , b и c задают вид движения точки в фазовом пространстве. При значениях параметров $a = 10$, $b > 1$ и $c = 8/3$ возникают хаотические колебания.

На рисунке 1 изображена фазовая траектория модели при заданных параметрах. По рисунку видно, что имеется два состояния равновесия, так называемые «странные аттракторы Лоренца». У данной траектории имеется несколько особенностей.

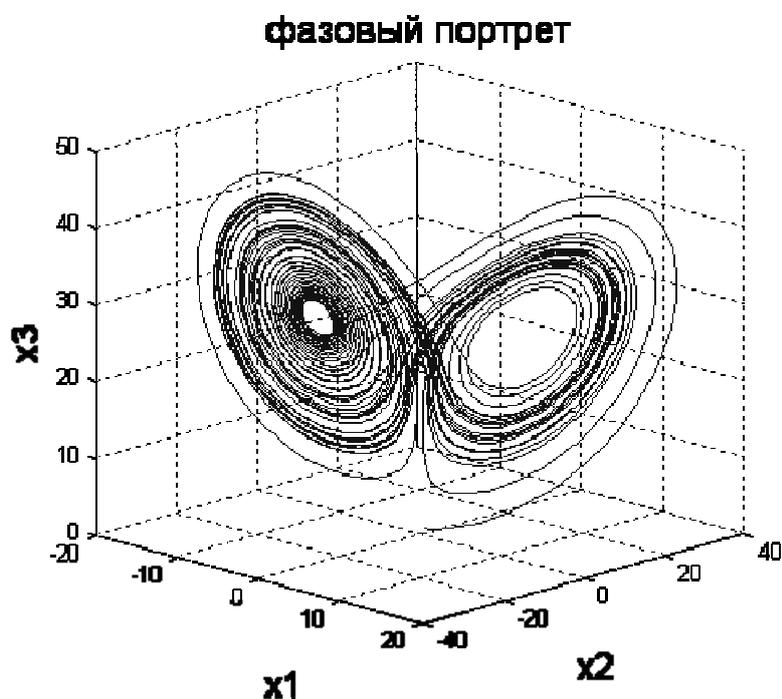


Рис. 1. Движение системы в фазовом пространстве

Первая особенность данной траектории заключается в том, что каждая из точек равновесия не является притягивающей. Однако траектория не уходит далеко от точек равновесия и занимает ограниченную область. Таким образом, получаются нерегулярные непериодические движения системы – в системе имеет место хаос.

Второй особенностью является то, что внутри данного аттрактора траектория движения очень чувствительна к начальным условиям. При малейшем расхождении в начальных условиях движение системы будут сильно расходиться почти сразу. Такие аттракторы получили название «странные аттракторы» [2].

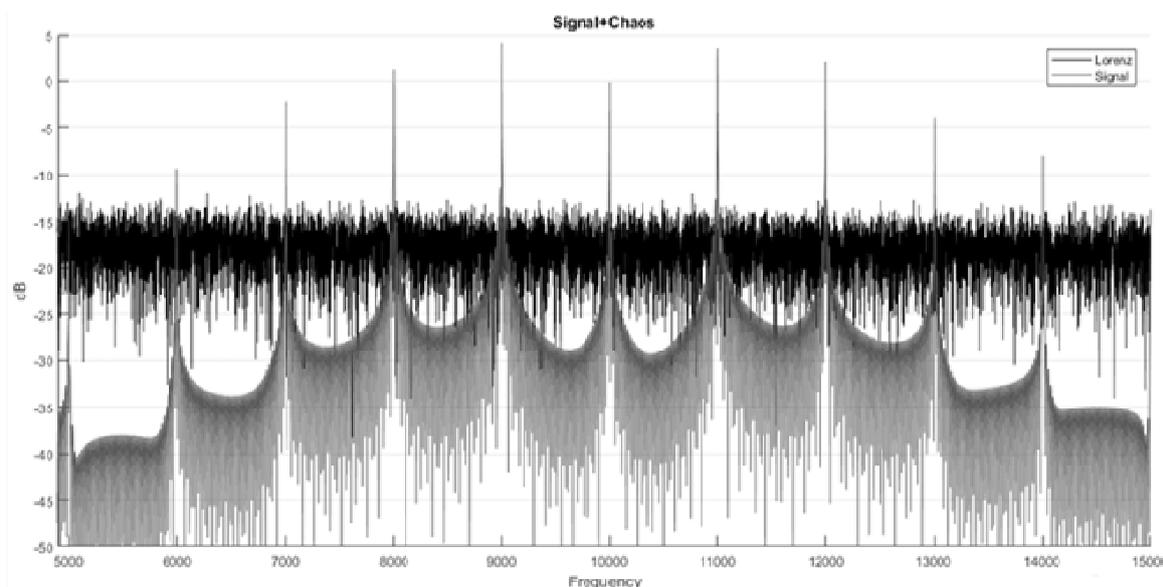


Рис. 2. Информационный сигнал с помехой в виде хаотического сигнала

Из рисунка 2 видно, что спектр сигнала с генератора хаотических колебаний Лоренца имеет схожий вид со спектром белого гауссовского шума. Это позволяет сделать вывод, что такие сигналы можно использовать в качестве широкополосной помехи на робототехнических комплексах. Для этого необходимо создавать устройства формирования хаотических колебаний или генераторы. Математические модели достаточно хорошо исследованы в теории, но для получения генераторов на практике в виде рабочего изделия необходимо пройти долгий путь разработки и отладки электронного устройства, построенного на дискретных элементах. Так же нет полной уверенности, что полученное устройство будет удовлетворять заданным характеристикам.

Другим вариантом создания устройств формирования хаотических колебаний является использование электронно-вычислительных средств (микропроцессоров, ПЛИС). Данный способ исключает долгий процесс разработки устройства на дискретных элементах. При написании программы формируемый сигнал задается математическими уравнениями, что дает больше уверенности в качестве выходного сигнала. Ограничением служит лишь скорость выполнения команд у вычислительного устройства, а также разрядность цифроаналогового преобразователя и скорость его работы [3].

Разрабатываемое устройство представляет собой набор генераторов хаотических колебаний, сигналы от которых поступают на специальный блок коммутации сигналов. Блок коммутации образует различные комбинации входных сигналов, такие как сумму, произведение, либо выводит каждый из них на определенное время, формируя тем самым последовательность хаотических сигналов, идущих друг за другом. На рисунке 3 представлена блок-схема разрабатываемого устройства.

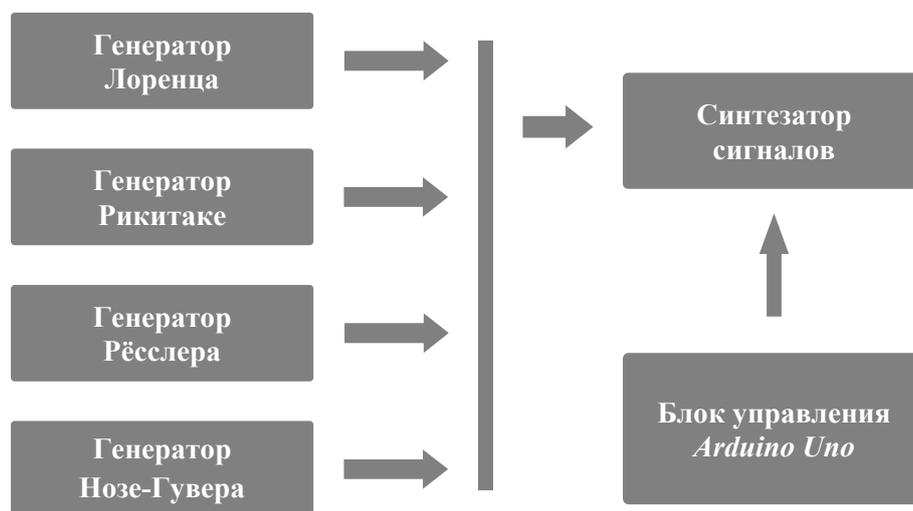


Рис. 3. Структурная схема устройства генератора

Предложенный в работе программно-аппаратный комплекс постановки сложных помех может применяться для использования робототехническими комплексами. Основными особенностями данного комплекса являются:

- универсальность;
- возможность расширения;
- интеллектуальное формирование сигнала.

Универсальность заключается в возможности содержать в одном устройстве несколько генераторов сигналов. Возможность расширения подразумевает быстрый способ обновления устройства путем его замены на новое более мощное либо просто обновления программы с новыми генераторами колебаний. Интеллектуальное формирование сигнала позволяет получать на выходе устройства колебания как с отдельного генератора, так и сумму сигналов, произведение, либо формирование сигнала как последовательность колебаний различной длительности и следующих в различном порядке.

Созданный программно-аппаратный комплекс постановки помех благодаря своим особенностям оказывает существенное влияние на управление информационной безопасностью.

Список использованных источников

1. Генераторы хаотических колебаний : учебное пособие / Б. И. Шахтарин и др. – М. : Гелиос АРВ, 2007. – 248 с. : ил.
2. Кобылкина П. И. Источники хаотических колебаний с дискретным временем / П. И. Кобылкина, Ю. А. Сидоркина, В. Д. Морозова // Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Радиофизика и радиотехника. – 2003. – № 62. – С. 140 – 147.
3. Литвинов, А. И. Быстрая разработка устройств ЦОС в системе Xilinx System Generator / А. И. Литвинов // Современная Электроника. – 2013. – № 1. – С. 64 – 69.

М. Ю. Тхоренко, А. М. Гаракоев

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

МОДЕЛЬ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В СИСТЕМАХ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С УЧЕТОМ КОНЕЧНОСТИ РАЗМЕРОВ ИСТОЧНИКА

Аннотация. В настоящей работе исследуется влияние конечности размеров источника на модель вторичного поля в аэроэлектроразведочных системах; описывается алгоритм учета данного влияния; анализируются ошибки и скорость сходимости данного алгоритма; приводятся оценки ошибок, возникающих в связи с неучетом данного эффекта в системах с источниками больших размеров.

M. Yu. Tkhorenko, A. M. Garakoev

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia)

THE MODEL OF THE SECONDARY FIELD IN AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE SOURCE GEOMETRY

Abstract. In this paper the influence of the source geometry on the secondary field in airborne electromagnetic systems is investigated; the algorithm taking into account this influence is introduced; errors and rate of convergence of this algorithm are analyzed; errors introduced by neglecting these effects are estimated.

Введение. Различные методы электроразведки давно и широко применяются для поиска нефтегазовых и рудных полезных ископаемых. По-видимому, впервые в практической геофизике электроразведочные методы были применены на рубеже 1920 – 1930 гг. братьями Шлюмберже [1]. За прошедшее с тех пор время арсенал доступных электроразведочных методов значительно расширился, в частности большое развитие получили методы электроразведки с контролируемым источником [2]. Одной из перспективных разновидностей метода электроразведки с контролируемым источником является так называемая аэроэлектроразведка, в ходе которой источник возбуждения и приемник электрических сигналов буксируются летательным аппаратом (самолетом, вертолетом или беспилотным аппаратом) [3]. Преимуществами данного метода является высокая производительность геосъемочных работ и возможность приводить исследования в удаленных, труднодоступных районах с умеренными затратами [4].

Традиционно в аэроэлектроразведке электромагнитное поле возбуждается рамками с током круговой формы [3]; в последние годы определенное распространение получили системы, в которых данные рамки имеют значительные геометрические размеры (см., например, [5]). При этом в геофизике для моделирования поля таких источников традиционно применяется формула для поля

точечного магнитного диполя [3], которая становится неприменима при размерах рамок, сравнимых с расстоянием от источника до земли и до приемника [6]. В связи с этим возникает задача учета влияния конечности размеров источника на возбуждаемое им электромагнитное поле с учетом взаимодействия данного поля с залегающими под поверхностью земли горными породами.

В настоящей работе данная задача решается в следующей постановке. Предполагается, что электромагнитное поле возбуждается горизонтальной рамкой круговой формы, содержащей несколько витков провода, по которому протекает ток синусоидальной формы с частотой ν ; центр данной рамки расположен на высоте h_e над поверхностью земли. Величина z -компоненты (ось OZ предполагается направленной вниз) вектора индукции электромагнитного поля измеряется детектором, расположенным на высоте h_r и на расстоянии r от центра возбуждающей рамки по горизонтали. Данные измерения подвергаются обработке, в ходе которой из полного поля выделяют составляющую B_z , связанную с вихревыми токами, текущими под поверхностью земли (так называемое вторичное поле) [2]. При этом предполагается, что горные породы, формирующие подстилающую поверхность, имеют горизонтально-слоистое строение с N слоями, где i -й слой имеет удельную проводимость σ_i и мощность d_i , при этом воздух, расположенный над поверхностью земли, предполагается абсолютно непроводящим. Требуется определить зависимость вторичного поля B_z от параметров ν , h_e , h_r , r .

Аналитическое представление решения. В пространстве над землей отсутствуют токи проводимости (за исключением области, занимаемой возбуждающими рамками), кроме того, при частотах, на которых производятся аэроэлектроразведочные работы, можно пренебречь и токами смещения, воспользовавшись так называемым квазистационарным приближением [6]. Тогда вектор B в верхнем полупространстве удовлетворяет уравнению

$$\nabla \times B = 0 \quad \text{и} \quad B = -\nabla U,$$

где U – скалярный потенциал магнитного поля.

В работе [1] показано, что величина B_z линейно зависит от скалярного потенциала источника U_e ; в частном случае возбуждения точечным магнитным диполем U_e и B_z имеют вид:

$$U_e = \frac{(mr)}{4\pi r^3}, \tag{1}$$

$$B_z = \frac{-\mu_0 m}{4\pi} \int n_0^2 \frac{n_1 - n_0 R_N}{n_1 + n_0 R_N} e^{-n_0(h_e + h_r)} J_0(n_0 r) dn_0, \tag{2}$$

где $n_1 = \sqrt{n_0^2 - 2\pi i \nu \mu_0 \sigma_1}$; m – дипольный магнитный момент источника, $\mu_0 \approx 1,2610^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная; R_N – функция, зависящая от n_0 ; d_i ; J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка. В работе [6] дается выражение для скалярного потенциала петли с током I в виде

$$U_e = I \frac{\iint (nr)}{4\pi r^3} dD, \quad (3)$$

где D – некая поверхность, натянутая на петлю (предполагается, что петля не имеет самопересечений); n – нормаль к данной поверхности, выбираемая в соответствии с направлением течения тока I . Подставляя выражение (3) в (2) и учитывая упомянутое выше свойство линейности, получаем следующее аналитическое представление решения искомой задачи:

$$B_z = \frac{-\mu_0 m}{4\pi} \iint dD \int n_0^2 \frac{n_1 - n_0 R}{n_1 + n_0 R} e^{-n_0(h_e + h_r)} J_0(n_0 r_D) dn_0, \quad (4)$$

где r_D – расстояние от элемента поверхности D до точки наблюдения.

Численная схема решения. Из формулы (4) видно, что поставленная задача сводится к вычислению обыкновенного и поверхностного интегралов. Методы вычисления обыкновенного интеграла из формулы (4) подробно рассмотрены, например в работе [7], в связи с чем не будем на них останавливаться. Перейдем к рассмотрению способа вычисления поверхностного интеграла.

Будем предполагать, что возбуждающая рамка имеет форму окружности радиусом R и содержит N_l витков провода. Тогда поверхность интегрирования D будет представлять из себя круг, ограниченный данной окружностью. Для вычисления интеграла по области D разобьем эту область на конечные элементы в форме кольцевых секторов. Для этого построим систему концентрических окружностей с центром, совпадающим с центром круга D , и радиусами $r_i = i\Delta R$, $i = \overline{0, N_r - 1}$, $\Delta R = R / N_r$, и систему лучей, проведенных из центра круга D под углами $r_i = i\Delta R$, $i = \overline{0, N_r - 1}$, $\Delta R = R / N$. Таким образом, всего имеем $N_e = N_r N_\phi$ элементов. Полярные координаты r_{ij}, ϕ_{ij} узлов интегрирования M_{ij} выберем в соответствии с формулами:

$$r_{ij} = r_i + \Delta R / 2 = (i + 1/2)\Delta R,$$

$$\phi_{ij} = \phi_j + \Delta\phi / 2 = (j + 1/2)\Delta\phi.$$

Окончательно для численной оценки B_z^n величины B_z будем иметь

$$B_z^n = \sum_{i=0}^{N_r-1} \sum_{j=0}^{N-1} \mathfrak{Z}^n(r_{ij}), \quad (5)$$

где $\mathfrak{Z}^n(r_{ij})$ – численная оценка интеграла вида

$$\mathfrak{Z}(r_{ij}) = \frac{-\mu_0 I}{4\pi} \int n_0^2 \frac{n_1 - n_0 R}{n_1 + n_0 R} e^{-n_0(h_e + h_r)} J_0(n_0 r_{ij}) dn_0;$$

здесь r_{ij} – горизонтальное расстояние от узла интегрирования M_{ij} до точки наблюдения, вычисляемое в соответствии с теоремой косинусов

$$r_{ij} = \sqrt{r_j^2 + r^2 - 2r_j r \cos \phi_j}. \quad (6)$$

Некоторые численные оценки. Для проверки корректности работы численной схемы, основанной на формулах (5), (6), был определен модуль разности величин B_z , рассчитанный на основе аналитической формулы (2) и численной схемы (5), (6) для рамок с различными радиусами, при этом ток через петлю выбирался так, чтобы ее дипольный магнитный момент πIR^2 оставался неизменным. Результаты расчетов отображены на рис. 1.

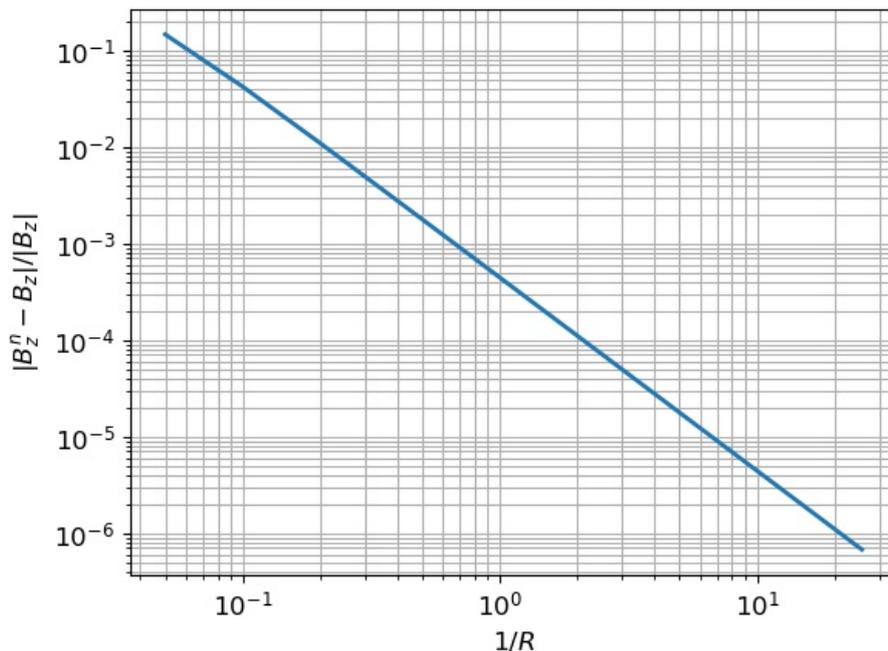


Рис. 1. Зависимость нормированной ошибки от обратного радиуса петли

Видно, что при стремлении радиуса петли к нулю, полученное численное решение стремится к аналитическому решению для точечного диполя, как и предсказывает теория.

Для того чтобы качественно охарактеризовать скорость сходимости полученной численной схемы, были вычислены величины B_z^n для различных N_e , результаты приведены на рис. 2.

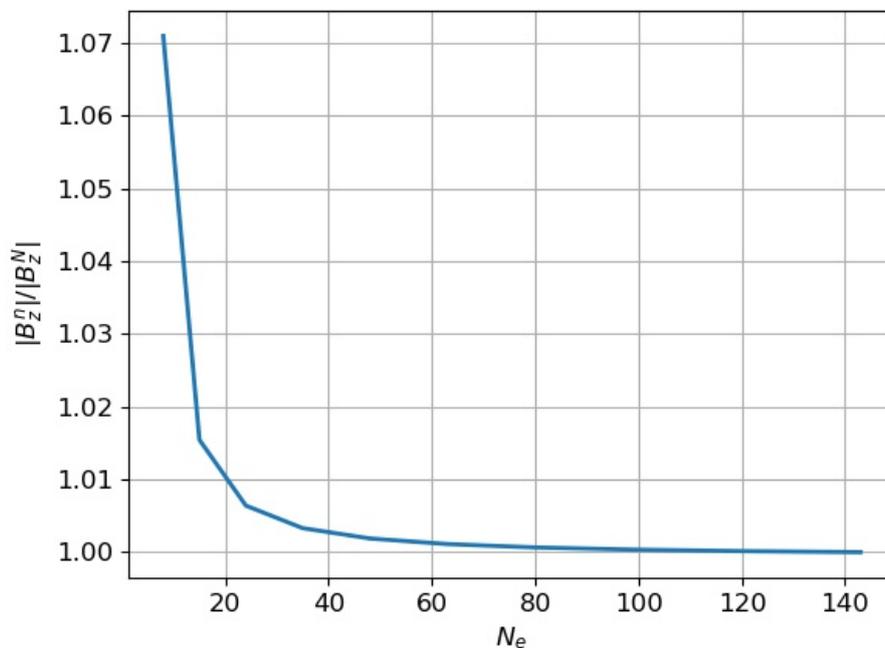


Рис. 2. Зависимость нормированная величины поля от числа конечных элементов

Видно, что B_z^n асимптотически приближается к некому порогу, который и является точным значением B_z .

Выводы. Итак, нами было получено решение рассматриваемой задачи об учете конечности размеров источника в модели вторичного поля для аэроэлектроразведочной системы. Решение представляет из себя численную схему, построенную на основании аналитического выражения (4) и дается формулами (5), (6). Правильность полученного решения подтверждается его сходимостью к аналитическому выражению (2) при стремлении радиуса петли к нулю; поведение решения качественно характеризуется скоростью сходимости, отображенной на рис. 2.

Полученное численное решение может быть использовано для вычисления ошибок, связанных с неучетом конечности размеров источника при обработке данных геофизических съемок. Предварительные расчеты показывают, что для больших систем данные ошибки могут превышать 10%. В будущем авторы планируют применить полученную численную схему для анализа работы существующих систем аэроэлектроразведки.

Список использованных источников

1. Жданов, М. С. Геофизическая электромагнитная теория и методы / М. С. Жданов. – М. : Научный мир, 2012.
2. Светов, Б. С. Основы геоэлектрики / Б. С. Светов. – М. : ЛКИ, 2008.
3. Жданов, М. С. Электроразведка / М. С. Жданов. – М. : Недра, 1986.
4. Kaufman, A. Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics / A. Kaufman, D. Alekseev, M. Oristaglio. – Elsevier, 2014.
5. Helicopter Electromagnetic (VTEM and ZTEM) Applications for Gold Exploration / J. M. Legault et al. – PDAC, Toronto, 2010.
6. Стрэттон, Дж. А. Теория электромагнетизма / Дж. А. Стрэттон. – М.–Л. : ГИТТЛ, 1948.
7. Hansen, E. Fast Hankel Transform Algorithm. IEEE Transactions on Acoustics / E. Hansen // Speech and Signal Processing. – 1985. – V. 33, № 3. – P. 666 – 671.

М. Ю. Тхоренко, Е. В. Мойланен, А. М. Гаракоев

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

АНАЛИЗ РАБОТЫ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ НА МАТЕРИАЛАХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СЪЕМОК В ЗОНЕ ЦЕНТРАЛЬНО-АФРИКАНСКОГО РАЗЛОМА

Аннотация. В настоящей работе исследуется влияние геометрии аэроэлектроразведочных комплексов на результаты геофизических съемок; описываются ошибки, возникающие при определении вторичного поля, связанные с неучетом конечности размеров источника; анализируются зависимости этих ошибок от различных параметров.

M. Yu. Tkhorenko, J. V. Moilanen, A. M. Garakoev

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia)

THE ANALYSIS OF DIFFERENT AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SYSTEMS ON DATA OBTAINED IN THE GEOPHYSICAL SURVEY IN THE CENTRAL AFRICAN RIDGE AREA

Abstract. In this paper the influence of the source geometry on the secondary field in airborne electromagnetic systems is investigated; errors introduced by neglecting of the source finiteness are described; the dependence of these errors on different parameters is analysed.

Введение. Одним из высокоэффективных методов современной поисковой геофизики является электроразведка. Впервые данный метод был применен на практике в 1920-х годах [1], за прошедшее с тех пор время арсенал электроразведочных методов, доступных практическому геофизику, значительно рас-

ширился; в частности, большое развитие получили методы электроразведки с контролируемым источником [2]. Одной из перспективных разновидностей метода электроразведки с контролируемым источником является так называемая аэроэлектроразведка [3], преимуществами которой являются высокая производительность геосъемочных работ и возможность проводить исследования в удаленных, труднодоступных районах [4].

Современные аэроэлектроразведочные комплексы представляют собой источник возбуждения (рамку с током) и измеритель электромагнитного поля, буксируемые на гибком тросе за летательным аппаратом; из измерений выделяется так называемое вторичное поле, связанное с токами, текущими под поверхностью земли [2]. При этом существуют два типа конструкции таких комплексов: с совмещенными источником и приемником и с разнесенными источником и приемником [1]. В настоящей работе мы будем в основном анализировать системы второго типа; отметим, однако, что методы, излагаемые в данной статье, в принципе применимы для любой аэроэлектроразведочной системы.

В последнее время определенное распространение получили системы с источниками, имеющими значительные геометрические размеры (см., например, [5]). Это представляет определенные сложности при интерпретации полученных данных, так как для вычисления поля источника в аэроэлектроразведке традиционно используется приближение точечного магнитного диполя [3], которое описывает реальное поле петли с током лишь приближенно.

В статье [6] описывается один из возможных способов учета влияния конечности размера источника на вторичное поле в электроразведочных системах. Вместе с тем в статье [6] данная задача решается в общей постановке; в настоящей работе мы применим результаты статьи [6] к анализу работы реально существующих аэроэлектроразведочных комплексов; для моделирования электрических свойств подстилающей поверхности будут использоваться данные, полученные одним из авторов в ходе проведения геофизических работ в зоне Центрально-Африканского разлома [7].

Ошибка определения вторичного поля, связанная с неучетом конечности источника. В работе [7] показано, что значение вертикальной компоненты вектора индукции вторичного поля B_z^l , вычисленное с учетом конечности размеров источника, будет отличаться от значения этой же величины B_z^d , вычисленной с использованием традиционного подхода, основанного на приближении точечного диполя.

Введем ошибку определения вторичного поля η соотношением

$$\eta = \frac{(B_z^l - B_z^d)}{(B_z^d)}.$$

Нашей задачей будет выяснение зависимости η от геометрии электроразведочной системы, рабочей частоты и свойств геоэлектрического разреза.

Зависимость ошибки определения вторичного поля от геометрии системы. Были проанализированы зависимости ошибки η от высоты источника h_e (при этом высота приемника h_r выбиралась в виде $h_r = h_e + \Delta h$) при следующих значениях параметров: дипольный момент источника $m = 10^6$ А·м², радиус петли $R = 20$ м, число витков $N_l = 10$ (амплитуда тока при этом $I \approx 79,6$ А), частота $\nu = 500$ Гц, горизонтальный разнос $r = 0$ м, геоэлектрический разрез моделировался однородным полупространством с удельной проводимостью $\sigma = 0,1$ См/м; результаты приведены на рис. 1. Видно, что ошибка убывает с увеличением высоты источника и приемника.

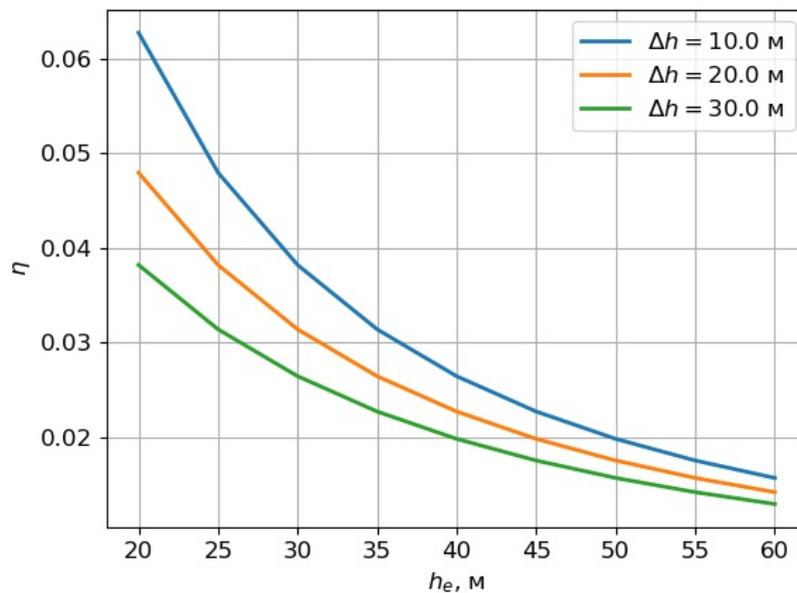


Рис. 1. Зависимость ошибки от высоты источника

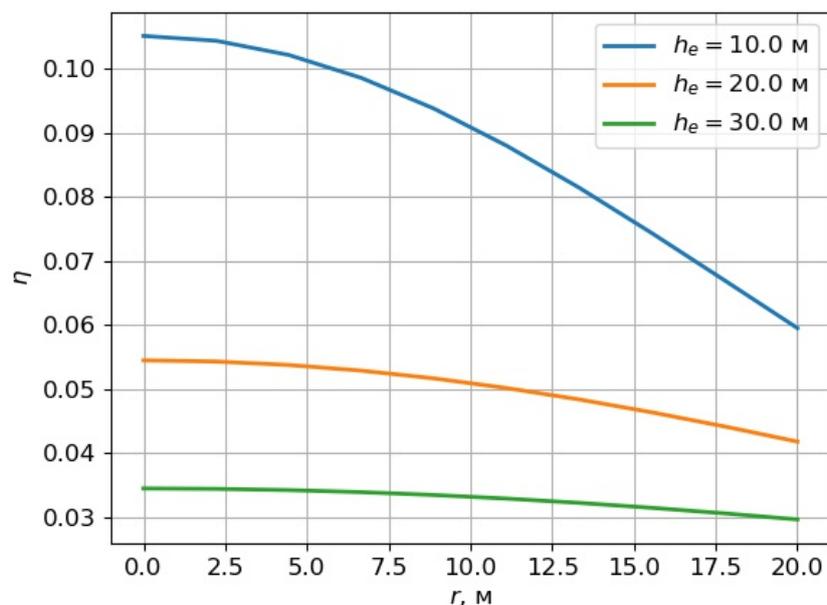


Рис. 2. Зависимость ошибки от горизонтального разноса

Так же были проанализированы зависимости ошибки η от горизонтального разноса r при высотах источника $h_r = 15$ м и приемника $h_e = 30$ м, все остальные параметры прежние; результаты приведены на рис. 2. Видно, что ошибка уменьшается с увеличением горизонтального разноса.

Зависимость ошибки определения вторичного поля от рабочей частоты и свойств геоэлектрического разреза. Была исследована зависимость ошибки η от частоты h_e при различных значениях проводимости (остальные параметры прежние); результаты приведены на рис. 3. Видно, что ошибка возрастает с увеличением частоты и проводимости.

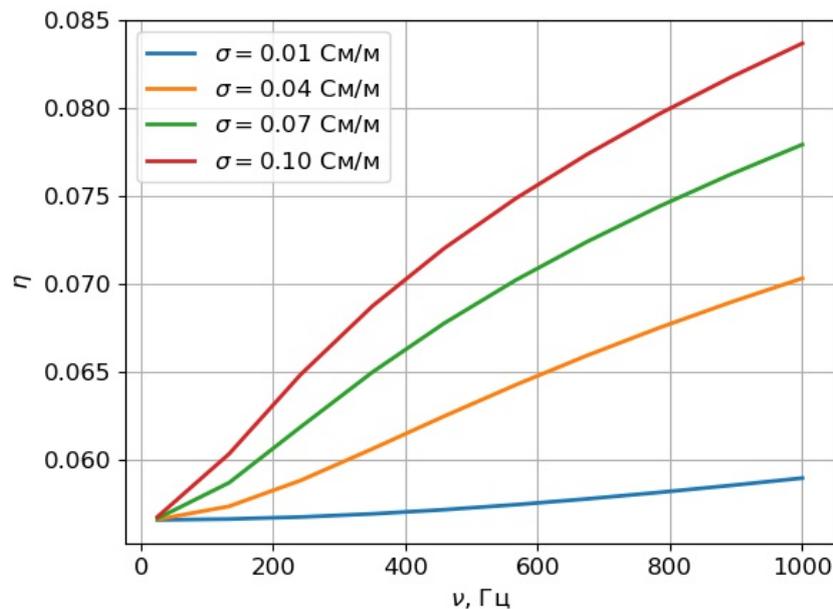


Рис. 3. Зависимость ошибки от частоты

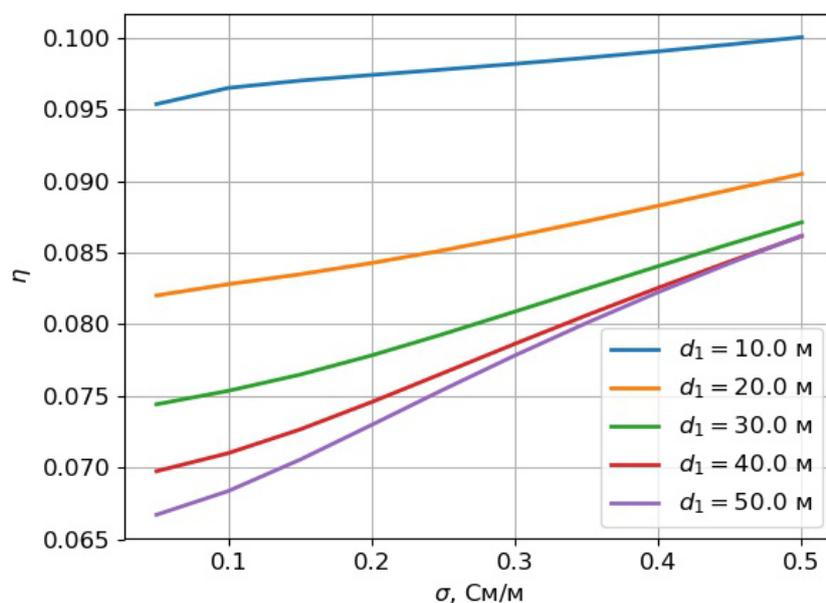


Рис. 4. Зависимость ошибки от проводимости верхнего слоя

Кроме того, было проведено моделирование геоэлектрического разреза как двухслойной среды, основание которой представлено изоляторами с удельной проводимостью $\sigma_0 = 0,001$ См/м, мощность первого слоя d_1 варьировалась. Была построена зависимость ошибки η от проводимости верхнего слоя σ , при этом предполагалось, что частота $\nu = 500$ Гц, остальные параметры прежние; результаты приведены на рис. 4. Видно, что ошибка возрастает с увеличением проводимости и уменьшением глубины первого слоя.

Выводы. Нами были проанализированы зависимости ошибок в определении вторичного поля, связанных с неучетом конечности размеров источника, от геометрии электроразведочной системы, рабочей частоты и свойств геоэлектрического разреза. Из анализа видно, что в некоторых случаях данные ошибки имеют весьма большую величину и могут приводить к искажению результатов геофизических съемок.

В будущем авторы планируют применить полученные в ходе подготовки настоящей статьи результаты при обработке (в частности, при инверсии) данных, полученных различными аэроэлектроразведочными системами.

Список использованных источников

1. Жданов, М. С. Геофизическая электромагнитная теория и методы / М. С. Жданов. – М. : Научный мир, 2012.
2. Светов, Б. С. Основы геоэлектрики / Б. С. Светов. – М. : ЛКИ, 2008.
3. Жданов, М. С. Электроразведка / М. С. Жданов. – М. : Недра, 1986.
4. Kaufman, A. Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics / A. Kaufman, D. Alekseev, M. Oristaglio. – Elsevier, 2014.
5. Helicopter Electromagnetic (VTEM and ZTEM) Applications for Gold Exploration / J. M. Legault et al. – PDAC, Toronto, 2010.
6. Тхоренко, М. Ю. Модель вторичного электромагнитного поля в системах аэроэлектроразведки с учетом конечности размеров источника / М. Ю. Тхоренко, А. М. Гаракоев.
7. Different scale complex airborne geophysical survey in the Central African ridge area / V. M. Kertsman et al. – EAGE-2018, Almaty, 2018.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИ ОДНОРОДНОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Аннотация. Рассматриваются измерения переменного магнитного поля над проводящей средой на борту летательного аппарата. Оценивается величина удельного электрического сопротивления эквивалентного однородного полупространства по измерениям квадратурной компоненты отраженного поля на фиксированной частоте. Проводится анализ зависимости отраженного переменного магнитного поля от удельного электрического сопротивления и высоты.

S. I. Konkov

(BMSTU, Moscow, Russia)

DETERMINING THE ELECTRICAL RESISTIVITY FOR THE MODEL OF A HOMOGENEOUS HALF-SPACE

Abstract. The measurements of an alternating magnetic field over a conducting medium on the board of an aircraft are considered. Electrical resistivity of an equivalent homogeneous half-space is estimated based on measurements of the quadrature component of the reflected field at a fixed frequency. The analysis of the dependence of the reflected alternating magnetic field on both electrical resistivity and height was carried out.

Введение. В данной работе оценивается величина удельного электрического сопротивления эквивалентного однородного полупространства по измерениям квадратурной компоненты отраженного поля на фиксированной частоте. Схема аэроэлектроразведочной системы показана на рис. 1.

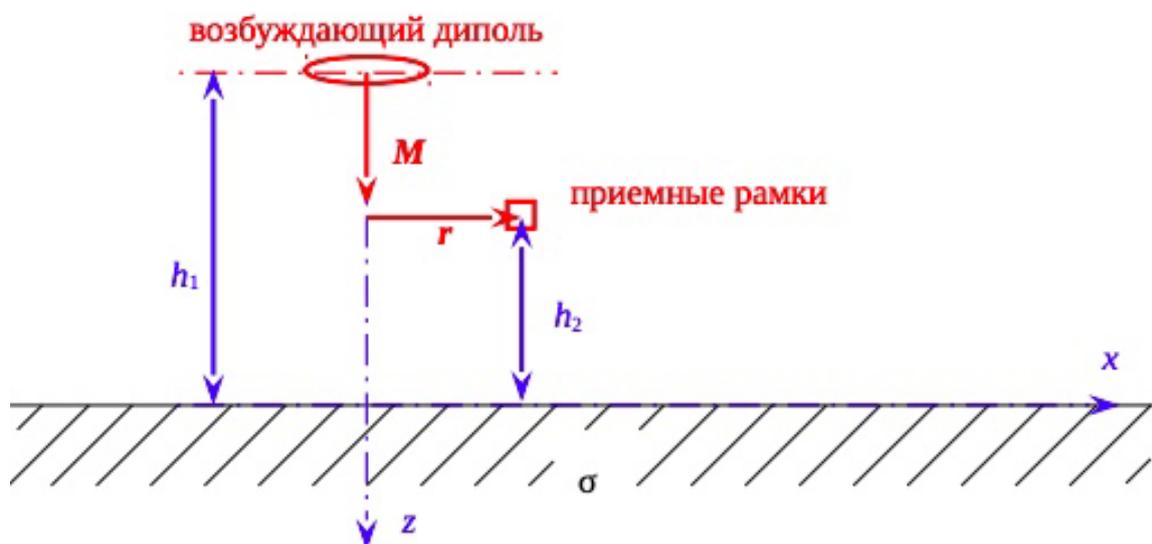


Рис. 1. Схема аэроэлектроразведочной системы

Целью работы является анализ зависимости отраженного переменного магнитного поля от удельного электрического сопротивления и высоты.

Модель отклика. Для получения аналитического выражения компонент поля отклика в точке расположения приемных рамок будем пользоваться подходом, изложенным в книге М. С. Жданова «Математическое моделирование» [1].

Рассмотрим сначала систему с частотным возбуждением поля:

$$\mathbf{I}^M = I^M \mathbf{e}_z = \pi a^2 I_0 e^{-i\omega t} \mathbf{e}_z. \quad (1)$$

Здесь a – радиус петли; I_0 – амплитуда тока в петле; ω – его частота; \mathbf{e}_z – единичный вектор, направленный вдоль оси z . Сигнал возбуждения в импульсных системах является периодическим, следовательно, представим в виде ряда Фурье, и все приведенные ниже соотношения справедливы для каждой из его гармоник.

В воздухе переменное магнитное поле \mathbf{H} , его скалярный потенциал U и соответствующий двумерный пространственный спектр u – все представимы суммой внешней (с индексом e , *external*) и внутренней (с индексом i , *internal*) компонент:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^e + \mathbf{H}^i, \quad U = U^e + U^i, \quad u = u^e + u^i. \quad (2)$$

При этом внешнее поле есть поле магнитного диполя I^M , спектр потенциала которого может быть выражен следующим образом:

$$u^e(z) = \frac{1}{2} I^M e^{-n_0(h_1+z)}, \quad -h_1 < z < 0, \quad n_0 = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}, \quad (3)$$

где k_x, k_y – пространственные частоты двумерного преобразования Фурье.

Воспользуемся горизонтально-слоистой моделью разреза, показанной на рис. 2.

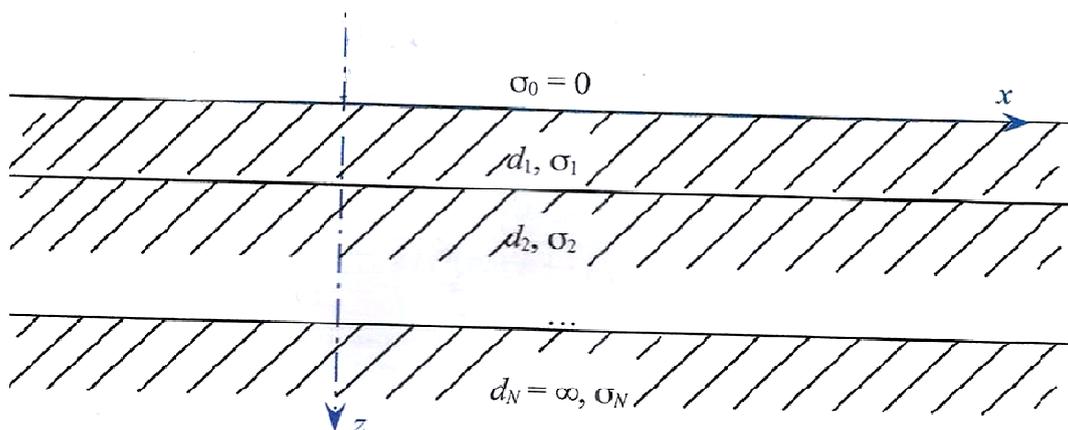


Рис. 2. Горизонтально-слоистая модель

В рамках такой модели отношение спектров внешней и внутренней частей потенциала поля $z = 0$ однозначно определяется спектральным магнитным импедансом разреза Z^* или приведенным спектральным импедансом R^* :

$$R^* = th \left\{ n_1 d_1 + arcth \left[\frac{n_1}{n_2} th \left(n_2 d_2 + \dots arcth \frac{n_{N-1}}{n_N} \right) \dots \right] \right\}, Z^* = -\frac{i\omega\mu_0}{n_1} R^*, \quad (4)$$

где $n_j = \sqrt{n_0^2 - i\omega\mu_0\sigma_j}$, $Re n_j > 0$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума); действует предположение, что относительная магнитная проницаемость всюду в рассматриваемой области равна 1. Связь импеданса и спектра потенциала можно записать в таком виде:

$$u|_{z=0} = u^e|_{z=0} + u^i|_{z=0} = u_0^e + u_0^i = 2 \frac{n_1 u_0^e}{n_1 + n_0 R^*}, \quad (5)$$

откуда

$$u_0^i = u_0^e \frac{n_1 - n_0 R^*}{n_1 + n_0 R^*}. \quad (6)$$

Кроме того, при $z < 0$ верно следующее представление:

$$u^i(n_0, z) = u_+^i e^{n_0 z} + u_-^i e^{-n_0 z}. \quad (7)$$

Для обеспечения условий затухания на бесконечности ($z \rightarrow -\infty$) необходимо положить $u_-^i = 0$. Тогда

$$u^i(n_0, z) = u_0^e e^{n_0 z} \frac{n_1 - n_0 R^*}{n_1 + n_0 R^*} = \frac{I^M e^{n_0(z-h_1)}}{2} \cdot \frac{n_1 - n_0 R^*}{n_1 + n_0 R^*}. \quad (8)$$

Теперь можно получить потенциал внутренней компоненты поля, или поля отклика, выполняя обратное преобразование Фурье:

$$\begin{aligned} U^i(r, z) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u^i(n_0, z) e^{-i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} u^i(n_0, z) J_0(n_0 r) n_0 dn_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Такие функции в общем виде могут быть записаны следующим образом [2]:

$$J_m(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! (m+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+m}, \quad |arg x| < \pi. \quad (10)$$

Учитывая свойства гамма-функции целого аргумента [2], это выражение можно переписать так:

$$J_m(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(m+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+m}, \quad (11)$$

в нашем случае $\arg x \equiv 0$.

Соответствующие компоненты поля получаются дифференцированием потенциала:

$$H_r^i(r, z) = \frac{\partial U^i(r, z)}{\partial r} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} u^i(n_0, z) J_1(n_0 r) n_0^2 dn_0, \quad (12)$$

$$H_z^i(r, z) = \frac{\partial U^i(r, z)}{\partial z} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} u^i(n_0, z) J_0(n_0 r) n_0^2 dn_0, \quad (13)$$

где J_1 – функция Бесселя первого рода 1-го порядка.

В простом частном случае, когда

1) приемник и передатчик находятся на одной оси, т.е. $r = 0$, а, следовательно, $J_0(0) = 1$, $J_1(0) = 0$;

2) модель среды – однородное полупространство, т.е. $R^* = 1$;
получаем:

$$H_r^i(0, -h_2) = 0, \quad (14)$$

$$H_z^i(0, -h_2) = -\frac{I^M}{4\pi} \int_0^{\infty} e^{-n_0(h_1+h_2)} \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} n_0^2 dn_0. \quad (15)$$

Очевидно, что амплитуда отклика падает с ростом h_1 и h_2 . Также понятно, что чем меньше проводимость полупространства σ_1 , тем ближе величина n_1 к n_0 и тем меньше абсолютная величина отклика. При $\sigma_1 = 0$ отклик $H_z^i(0, -h_2) = 0$. Иначе говоря, чем больше сопротивление эквивалентного полупространства, так называемое кажущееся удельное электрическое сопротивление ρ_a на частоте ω , тем меньше отклик. Если же напротив, среда является очень хорошим проводником ($\sigma_1 \rightarrow \infty$), то отклик выглядит следующим образом:

$$H_z^i(0, -h_2) \rightarrow -\frac{I^M}{4\pi} \int_0^{\infty} n_0^2 e^{-n_0(h_1+h_2)} dn_0 = -\frac{I^M}{2\pi(h_1 + h_2)^3}, \quad (16)$$

что соответствует полностью отраженному сигналу. Известно, что любая компонента поля для импульсной системы, например вертикальная, может быть выражена через соответствующие компоненты гармонических сигналов следующим образом [1]:

$$H_z(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{\infty} H_z^{(1)}(\omega) p(\omega) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (17)$$

где $H_z^{(1)}(\omega)$ – гармоническая вертикальная компонента поля, соответствующая возбуждению с амплитудой 1 на частоте ω ; $p(\omega)$ – спектр сигнала возбуждения. В частном случае периодического возбуждения с частотой ω_0 , характерной для всех импульсных систем, это соотношение можно записать через ряд Фурье:

$$H_z(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{\infty} H_z^{(1)}([1 + 2k]\omega_0) p([1 + 2k]\omega_0) p([1 + 2k]\omega_0) e^{-i[1+2k]\omega_0 t}, \quad (18)$$

где отсутствие четных гармоник обусловлено симметричностью положительного и отрицательного импульсов возбуждающего сигнала. Для абсолютно проводящего полупространства, согласно выражению (16), отклик $H_z^{(1)}(\omega)$ не зависит от частоты, а значит, является просто коэффициентом пропорциональности. Если его вынести за знак суммирования, мы получим поделенный на $2\pi(h_1 + h_2)^3$ сигнал возбуждения.

Результаты работы. После составления математической модели зависимости отклика от геометрических и электрических параметров получен алгоритм решения прямой задачи – вычисления отраженного поля по заданным параметрам источника и среды. В результате выполнения программы по полученным результатам был построен график зависимости квадратурной и синфазной составляющих отраженного сигнала от удельной электрической проводимости однородного полупространства, представленный на рис. 3.

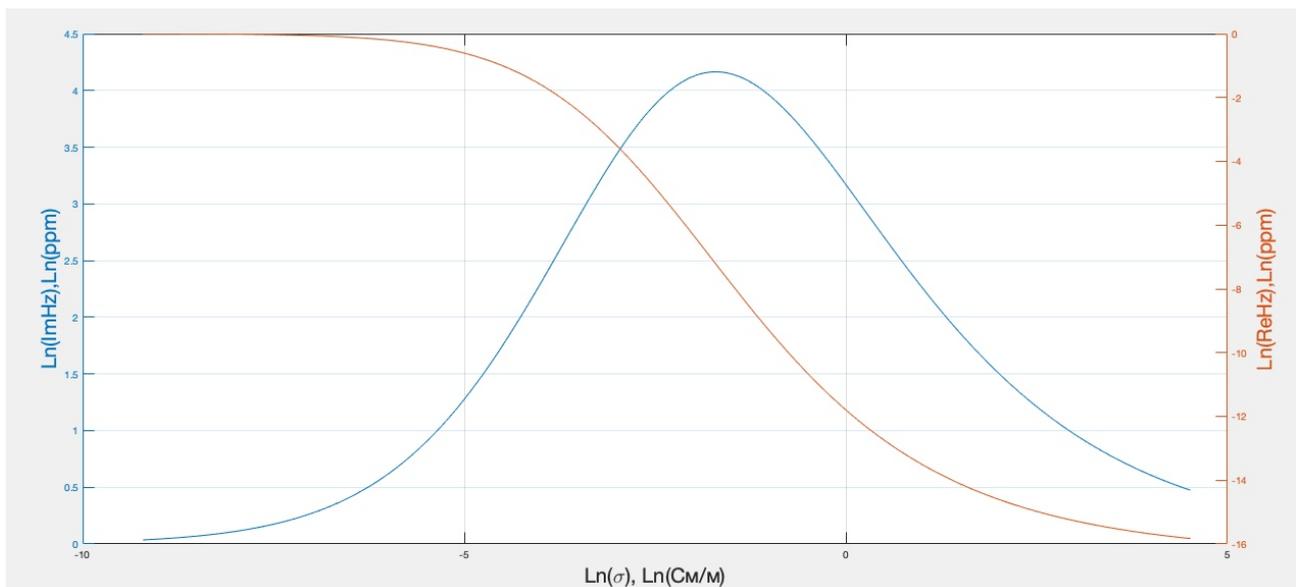


Рис. 3. График зависимости квадратурной и синфазной составляющих отраженного сигнала от удельной электрической проводимости однородного полупространства на высоте $z_h = 200$ м

Также был построен контурный график зависимости удельной электрической проводимости от квадратурной компоненты отклика изолирующей ветки и высоты z_h , представленный на рис. 4.

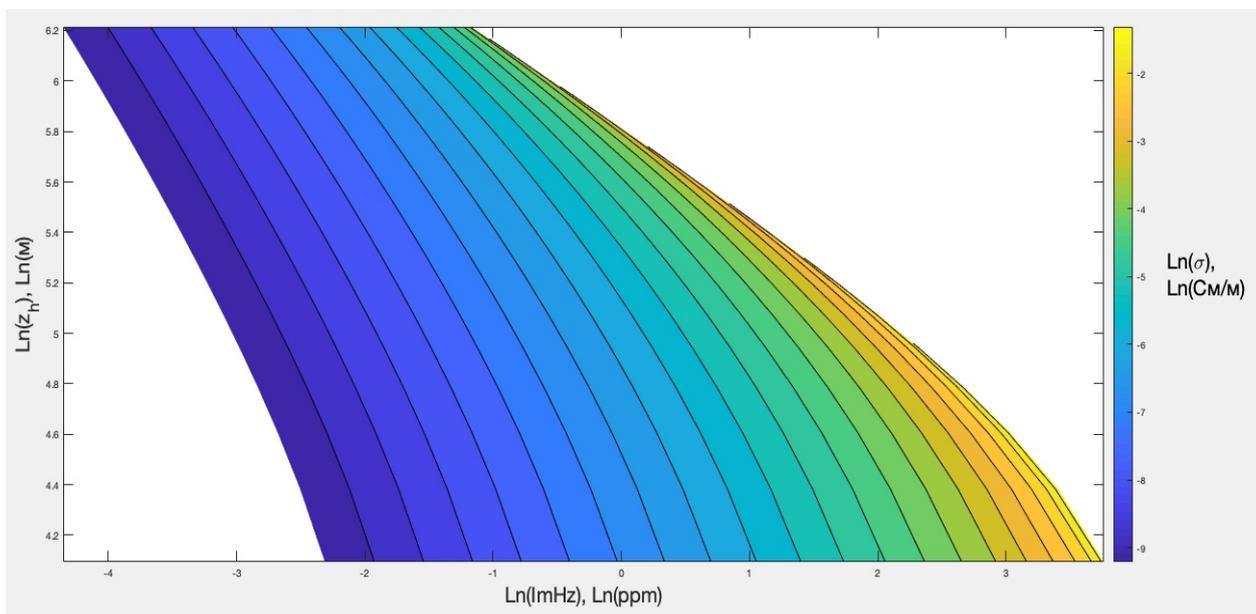


Рис. 4. Контурный график зависимости удельной электрической проводимости от квадратурной компоненты отклика изолирующей ветки и высоты z_h

При выполнении аэрогеофизической съемки над соленым озером Тус были получены следующие данные, представленные на рис. 5 и 6.

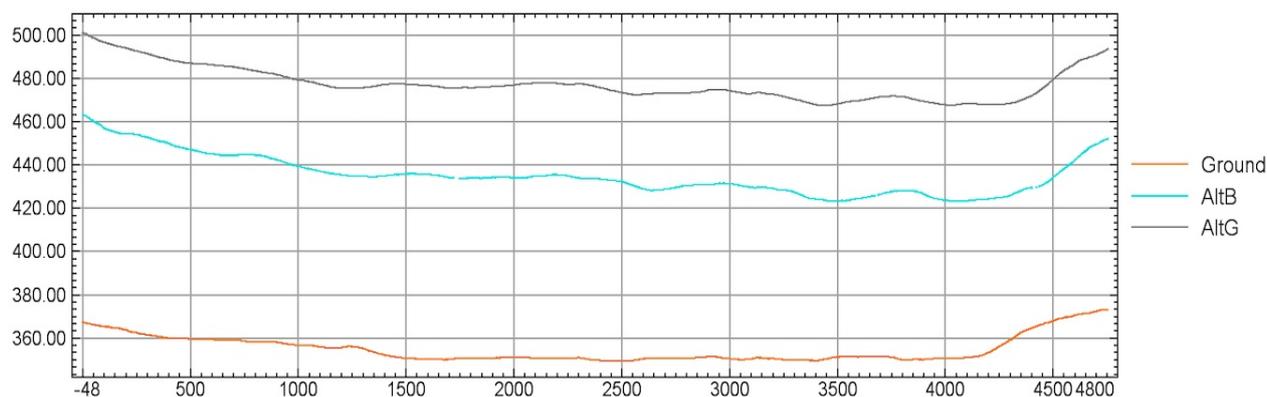


Рис. 5. Графики зависимости уровня земли (оранжевый цвет), высоты приемной рамки (голубой цвет), высоты полета самолета (серый цвет) от GPS-координат Земли

Пользуясь данными, полученными в результате выполнения программы и при выполнении аэрогеофизической съемки над соленым озером Тус, были построены графики, представленные на рис. 7.

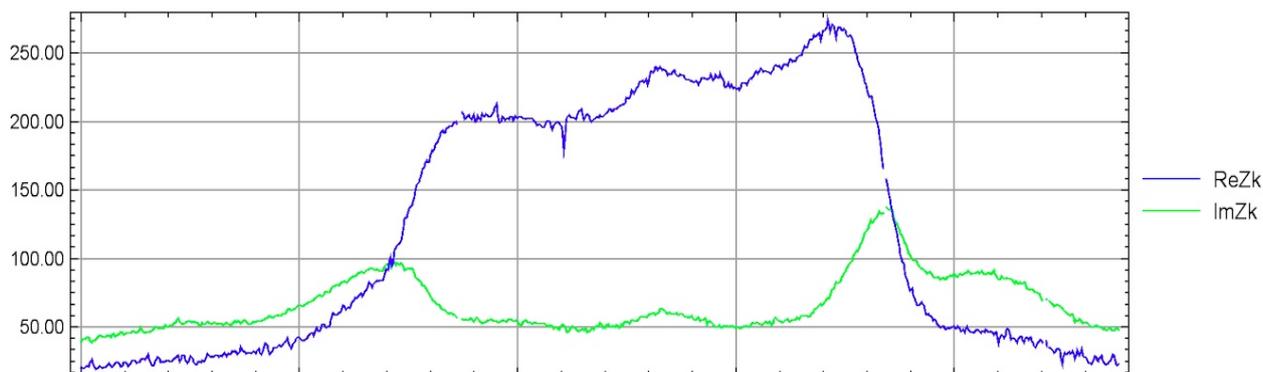


Рис. 6. Графики зависимости реальной (синий цвет) и мнимой (зеленый цвет) компонент поля отклика

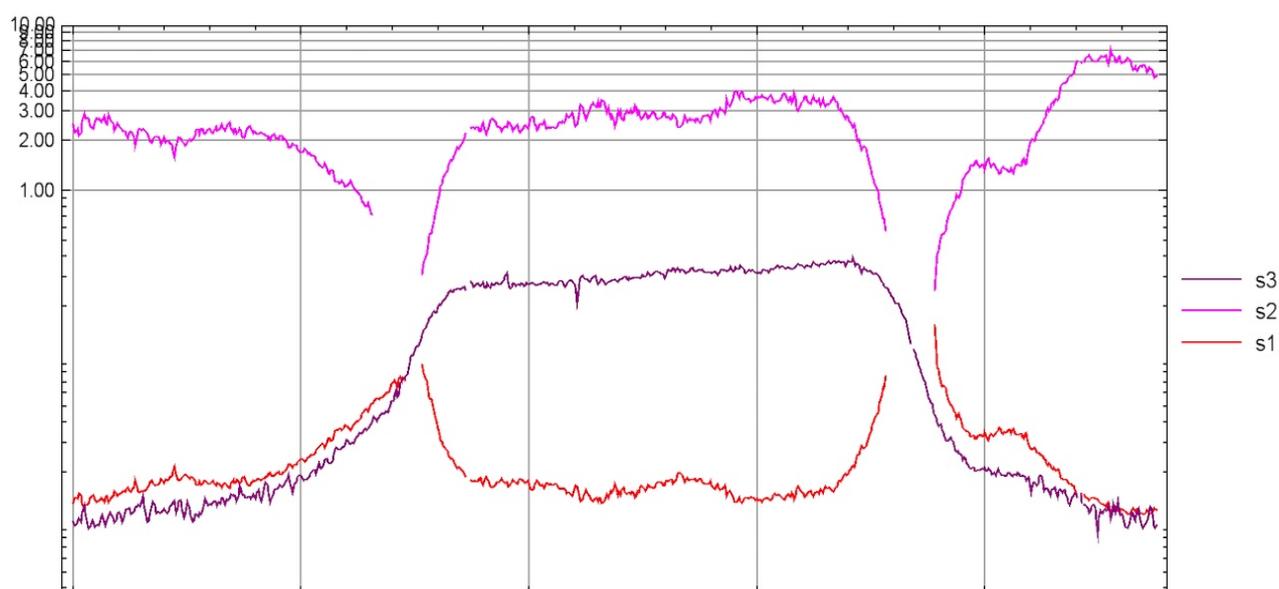


Рис. 7. Графики зависимости удельной электрической проводимости от синфазной (сиреневый цвет), изолирующей ветки квадратурной (красный цвет) и проводящей ветки квадратурной (розовый цвет) компонент поля отклика

Вывод. В результате выполнения работы получен алгоритм вычисления отраженного поля по заданным параметрам источника и среды. Благодаря этому алгоритму была исследована зависимость квадратурной и синфазной компонент поля отклика от удельной электрической проводимости, и выделены особенности их поведения. По полученным данным были рассчитаны кажущиеся удельные электропроводности среды и для проводящей, и для изолирующей частей земной коры по реальным данным.

Список использованных источников

1. Жданов, М. С. Электроразведка / М. С. Жданов. – М. : Недра, 1986.
2. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974.

Р. А. Дроков, С. В. Карманов, В. Н. Назаров, И. А. Елизаров
(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия)

БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Аннотация. В работе рассматривается подход к построению системы мониторинга в животноводстве на базе беспроводных технологий.

R. A. Drokov, S. V. Karmanov, V. N. Nazarov, I. A. Elizarov,
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

WIRELESS TECHNOLOGIES IN FARMING

Abstract. The paper considers an approach to the construction of a monitoring system in farming based on wireless technologies.

Один из основных трендов в современном животноводстве – это автоматизация. Это подразумевает использование технических средств и программного обеспечения для сбора данных о показателях животных для автоматизированного и индивидуального подхода к уходу за животными и называется точным животноводством.

Обязательным элементом точного животноводства является автоматизированная система мониторинга и учета. Основными элементами системы мониторинга в животноводстве являются датчики и автоматизированная система сбора данных и управления. Вся информация от датчиков поступает в систему с помощью считывателей, а затем система сбора данных и управления осуществляет обработку данных, архивирование, визуализацию и формирование отчетов.

Для сбора информации с большого количества датчиков рационально использовать беспроводные каналы связи. Одним из наиболее эффективных подходов являются RFID-технологии.

RFID-система включает в себя особые радиочастотные метки, оборудование и программное обеспечение (рис. 1). Данные идентификации хранятся на метке и передаются считывателю. Для контроля на объект закрепляется метка с уникальной информацией, которая позволяет его идентифицировать. Метка по радиосвязи передает данные об объекте на RFID-считыватель, а затем в базу данных, что дает возможность в режиме реального времени отслеживать его состояние [1].

Автоматизация животноводства с использованием RFID-технологии поможет фермерским хозяйствам и предпринимателям, работающим в сфере выращивания поголовья, провести на современном уровне инвентаризацию всего крупного рогатого скота.



Рис. 1. Структура системы учета на базе RFID-технологии

Основные преимущества RFID-технологии:

- не требуется прямая видимость радиочастотной метки, чтобы считывать из нее информацию;
- высокая скорость чтения меток;
- возможно одновременное чтение большого количества меток;
- возможно изменение информации в метке;
- долговечность;
- высокая степень безопасности, которая обеспечивается применением уникального идентификатора метки, а также шифрованием данных, записываемых в метку;
- устойчивость к воздействию окружающей среды.

RFID-технологии могут помочь фермерским хозяйствам и предпринимателям, работающим в сфере выращивания поголовья, провести на современном уровне инвентаризацию скота.

RFID-очипирование существенно улучшит процесс управления животноводством. Технология позволит автоматизировать все этапы от кормления до мойки и стрижки животных, а также выявить и помочь сократить поголовье, имеющее наследственные болезни. С помощью этой технологии можно оптимизировать планы вакцинаций и, кроме того, предотвратить несанкционированную подмену племенных особей. Технология RFID предполагает размещение на теле или внутри тела животного радиочастотных меток. Некоторым особям вживляют чипы под кожу либо прикрепляют на ухе как клипсу. Другие будут носить метку в виде ошейника или в желудке в форме керамической капсулы.

Автоматизация в животноводстве с использованием беспроводных технологий дает следующие преимущества.

1. Быстрая идентификация животного на расстоянии.
2. Безопасность животных: легко узнать, если какое-то животное оказалось не в своем загоне или не пришло с пастбища; вовремя диагностировать болезни и реагировать на них.
3. Электронный паспорт. Для каждого животного можно завести свой электронный документ принятого мирового стандарта, в котором будет собрана необходимая о нем информация: порода, прививки, вязки и т.д.

4. Упрощается кормление. Установив считыватель около кормушек, можно легко определить информацию о специфике и количестве корма для каждого животного, а также сопоставить эти сведения с получаемыми надоями.

С помощью RFID-системы можно:

- регистрировать события, такие как время входа, выхода, нахождения животного в зоне, к примеру, когда животное зашло в загон, сколько пробыло, когда вышло, как часто принимало пищу;
- отслеживать перемещение: каждое животное будет в поле вашего зрения благодаря сигналам, посылаемым с меток;
- разделять кормление и загоны: можно поставить считыватели на механизмах ворот и настроить их на определенных животных;
- осуществлять автоматическое взвешивание: регулярное взвешивание животных в автоматическом режиме позволит вовремя диагностировать болезни и реагировать на них;
- собирать полезную статистику: вы увидите, как часто и сколько животное потребляло корма и каковы после этого были удои, сколько времени животное проводит на пастбище, а также сможете осуществлять автоматическое взвешивание.

Такие системы можно применять в автоматизированных коровниках, свинарниках и других помещениях для животных, на фермах и в агрокомплексах – везде, где содержится много скота.

Применение беспроводных систем в автоматизации животноводства позволяет уменьшить затраты на персонал и время на заполнение документации, отслеживая статистику, можно регулировать время и частоту кормления животных, а также вовремя диагностировать болезни и реагировать на них.

Внедрение RFID-систем позволяет перейти к автоматическому заполнению и ведению электронного паспорта животного.

Список использованных источников

1. Григорьев, П. В. Особенности технологии RFID и ее применение / П. В. Григорьев // Молодой ученый. – 2016. – № 11. – С. 317 – 322.

А. М. Гараков, М. Ю. Тхоренко

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

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Аннотация. В статье описывается алгоритм управления движением летательным аппаратом при выполнении аэрогеофизической съемки. Представлен ПИД-регулятор в различных реализациях в зависимости от выполняемых задач.

AIRCRAFT CONTROL ALGORITHM WHILE PERFORMING AIRBORNE GEOPHYSICAL SURVEYS

Abstract. The article describes the algorithm for controlling the motion of an aircraft while performing airborne geophysical surveys. PID controller is presented in various implementations depending on the task performed.

Введение. Управление летательным аппаратом является одним из основных параметров, влияющих на качество съемочного материала. Пилот является элементом системы управления, поскольку при аэрогеофизических работах используется пилотируемая авиация. Качество управления зависит от многих факторов, например реакция пилота, надежность алгоритма управления и т.д.

Пилоту необходимо своевременно получать необходимые данные для пилотирования. Эти данные должны быть максимально точные. Такие данные пилот получает с помощью специального индикатора, установленного в кабине. Индикатор типа «стрелка» позволяет пилоту осуществлять максимально точный проход по заданному съемочному маршруту [1]. В основе алгоритма управления лежит классический ПИД-регулятор [2 – 5].

В целом полет при аэросъемке [6] можно разделить на несколько этапов. Основными этапами являются заход на линию проводки и непосредственно проводка. В первом этапе важной характеристикой является угловое расхождение, а во втором боковое (латеральное) отклонение летательного аппарата от маршрута.

Целью алгоритма является минимизация этих характеристик.

1. Объект управления

Поскольку в качестве характеристики для минимизации выступает боковое уклонение летательного аппарата от заданной траектории, будем рассматривать упрощенную модель движения:

$$\ddot{x} = a = \dot{v}, \quad \dot{x} = v. \quad (1)$$

Здесь x – боковое уклонение от траектории; v – горизонтальная скорость летательного аппарата.

Пусть летательный аппарата движется равноускоренно, тогда боковое уклонение примет вид

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad (2)$$

где v_0 , x_0 – начальная горизонтальная скорость и начальное положение летательного аппарата. Положим скорость как $v = at + v_0$ и получим следующее соотношение для времени t_1, t_2 :

$$x = \left(\frac{at_1^2}{2} + v_0 t_1 + x_0 \right) + vt_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{at_1^2}{2} + v_0 t_1 + x_0 + (at_1 + v_0)t_2 = a \left(\frac{t_1^2}{2} + t_1 t_2 \right) + v_0(t_1 + t_2) + 1x_0. \quad (3)$$

Соотношение (3) фактически представляет собой классический ПИД-регулятор, который далее будет описываться для каждого из этапов проводки.

2. Прямолинейная проводка

Основным параметром для алгоритма управления в режиме прямолинейной проводки является боковое уклонение, тогда алгоритм ПИД-регулятора для данного режима в рекуррентной форме будет иметь следующий вид:

$$u_j = u_{j-1} + k_p(x_j - x_{j-1}) + k_i x_j + k_d(x_j - 2x_{j-1} + x_{j-2}), \quad (4)$$

где j – номер шага согласно отсчетам спутниковой навигационной системы; k_p , k_d , k_i – коэффициенты ПИД-регулятора; u_j – величина, которая подается на индикатор пилоту.

Если рассматривать соотношение (3) в контексте соотношения (4), то можно увидеть, что коэффициенты k_p , k_d , k_i будут определяться следующим образом:

$$k_p = t_1 + t_2, \quad k_d = \frac{t_1^2}{2} + t_1 t_2,$$

$$k_i = 1.$$

Соотношения для времени t_1, t_2 определяются как

$$t_1 = \frac{d_0}{v_{cp}},$$

$$t_2 = \frac{d_1 + x}{v_{cp}},$$

где d_0, d_1 – дистанция упреждения и дистанция упреждения с учетом текущей угловой скорости; v_{cp} – средняя горизонтальная скорость летательного аппарата.

Вследствие того факта, что могут возникнуть недопустимые управления, целесообразно ввести логарифмический фильтр, тогда соотношение (4) примет вид

$$u_j = (1 - \lambda)u_{j-1} + \lambda \arctg\{k_p(x_j - x_{j-1}) + k_i x_j + k_d(x_j - 2x_{j-1} + x_{j-2})\}, \quad (5)$$

где $\lambda \ll 1$ – коэффициент логарифмического фильтра.

3. Криволинейная проводка

Проводка летательного аппарата по криволинейной траектории возникает, когда осуществляется заход на траекторию аэросъемки. Основной характе-

ристикой будет являться угловое уклонение ЛА от криволинейной траектории. Соотношение (4) примет вид

$$u_j = u_{j-1} + k_p(\alpha_j - \alpha_{j-1}) + k_d(\alpha_j - 2\alpha_{j-1} + \alpha_{j-2}). \quad (6)$$

По аналогии с соотношением (5) применяем логарифмический фильтр, тогда (6) примет вид

$$u_j = (1 - \lambda)u_{j-1} + \lambda\{k_p(\alpha_j - \alpha_{j-1}) + k_d(\alpha_j - 2\alpha_{j-1} + \alpha_{j-2})\}.$$

Если в случае прямолинейной проводки применяется ПИД-регулятор, то в криволинейной проводке используется ПД-регулятор. Это можно объяснить тем, что классический ПИД-регулятор хорошо справляется в установившемся режиме, так как прямолинейная проводка будет установившимся режимом. Но в случае криволинейной проводки применяется ПД-регулятор, поскольку этот режим будет переходным.

Заключение. Данный алгоритм позволяет осуществлять навигацию при аэрогеофизической съемке и получить качественный съемочный материал. Но в данных алгоритмах присутствуют и недостатки. В частности при криволинейной проводке необходимо вручную задавать радиус разворота летательного аппарата, а также некоторые характеристики. Дальнейшее исследование будет направлено на устранение всех недостатков алгоритма и усовершенствование.

Список использованных источников

1. Каршаков, Е. В. Особенности управления летательным аппаратом при выполнении аэрогеофизической съемки / Е. В. Каршаков // Проблемы управления. – 2012. – № 3. – С. 71 – 76.
2. O'Dwyer, A. PID compensation of time delayed process 1998 – 2002: a survey / A. O'Dwyer // Proceedings of the American Control Conference. – Denver, Colorado, 2003. – P. 1494 – 1499.
3. Денисенко, В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации / В. В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66 – 74; 2007. – № 1. – С. 78 – 88.
4. Astrom, K. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning / K. Astrom and T. Hagglund. – 2nd Edition. – Instrument Society of America, 1995
5. Knospe, C. R. PID Control: Tuning and Anti-Windup Techniques, “Practical Control Techniques for Control Engineering” workshop at 2000 American Control Conference / C. R. Knospe. – 2000.
6. Гаракоев, А. М. Управление процессом аэрогеофизической съемки с помощью системы экватор / А. М. Гаракоев, Е. В. Мойланен // Материалы 15-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2018, Воронеж). – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2018. – Т. 2. – С. 13 – 17.

Секция III

УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ, СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ И БИОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УПРАВЛЕНИЕ В ОБРАЗОВАНИИ

С. И. Немченко, Р. А. Долбин, А. С. Разнополов, Д. А. Баранов
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ,
Тамбов, Россия)

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ СТАНЦИЙ ПОМЕХ И ПУНКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. Рассматриваются пути повышения качества обучения с помощью использования многофункциональной информационно-справочной системы. Рассмотрены этапы разработки и способы применения системы для обучения специалистов различных категорий. В качестве примера представлена многофункциональная информационно-справочная система «Наставник».

S. I. Nemchenko, R. A. Dolbin, A. S. Raznopolov, D. A. Baranov
(The Multiservice Training Center and Radio Electronic
Warfare Tactical Employment, Tambov, Russia)

INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR TRAINING SPECIALISTS OF INTERFERENCE STATIONS AND CONTROL ITEMS

Abstract. The article discusses ways to improve the quality of training for specialists using the multifunctional information and reference system for data management. The stages of development and methods of using a multifunctional information and reference system for training specialists of various categories are considered. As an example, the multifunctional information system “Nastavnik” is presented.

Задача накопления, обработки и обмена информацией стояла перед человечеством на всех этапах его развития. В течение долгого времени основными инструментами для ее решения были головной мозг и органы чувств человека.

Разработка электронно-вычислительных машин позволила упростить и ускорить процесс информационного обмена. Одним из примеров системного применения ЭВМ в мировой практике являются административные системы обработки данных (автоматизация банковских операций, бухгалтерского учета, резервирования и оформления билетов и т.п.). Все эти системы опираются на автоматизированные информационные базы [1]. В памяти ЭВМ хранится и накапливается информация, необходимая для решения различных прикладных задач.

При решении такой задачи система требует ввод определенных исходных данных, часть из которых запрашивается из информационной базы. Создание автоматизированной информационной системы требует качественно нового подхода к организации данных [2].

В настоящее время в России активно применяются концепции удаленного обучения. Опыт подготовки специалистов средств радиоэлектронной борьбы с наземными системами управления войсками и оружием в Межвидовом центре подготовки и боевого применения войск РЭБ (учебном и испытательном) показал необходимость разработки и внедрения в процесс обучения многоуровневой информационно-справочной системы. Она предполагает решение следующих задач:

- оперативное предоставление необходимой справочной информации в удобном виде;
- сокращение времени подготовки преподавателя к занятию;
- наглядная демонстрация различных физических процессов, в том числе и быстро меняющихся (видео- и фотоматериалы, 3D-модели, учебные фильмы, специальное программное обеспечение и т.д.);
- автоматизация процесса контроля знаний обучаемых;
- качественное изменение уровня теоретических знаний и практических навыков обучаемых;
- сокращение времени освоения программ обучения.

Информационно-справочные системы обеспечивают сбор, хранение, обработку, поиск, выдачу информации, необходимой в процессе принятия решений задач из любой области. Они помогают анализировать проблемы и создавать новые продукты [3].

Для решения этих задач была разработана многофункциональная информационно-справочная система «Наставник».

Перед началом работы по созданию многофункциональной информационной системы «Наставник» была проведена структуризация методической, научной и преподавательской деятельности цикла боевой подготовки специалистов средств РЭБ с наземными системами управления войсками и оружием.

При проектировании системы использовались:

- портативная серверная платформа OpenServer;
- реляционная система управления базами данных MySQL;
- система управления содержимым Joomla;
- система управления курсами Moodle.

Актуальность многофункциональной информационно-справочной системы «Наставник» состоит в повышении эффективности профессиональной подготовки специалистов радиоэлектронной борьбы с использованием интерактивных форм обучения.

Преимуществами данной системы являются:

- удобство и простота использования (вся информация сгруппирована по разделам и подпунктам. Каждый военнослужащий может быстро и легко найти нужную ему информацию, методическое пособие или руководящий документ, посмотреть видеоматериал по интересующей его технике РЭБ, пройти тест по технической, специальной и тактико-специальной подготовке, а также ознакомиться с фотоматериалами конкурсов, выставок, учений и других мероприятий, которые организовывал цикл боевой подготовки или принимал в них участие);
 - наглядность (на главной странице данной информационной системы можно найти несколько мультимедийных вкладок с основными документами и пособиями по боевой технике);
 - информативность и удобная навигация по структуре базы (каждый раздел содержит оглавление, созданное из гиперссылок, с помощью которых можно быстро и легко перейти на интересующий раздел);
 - работа в режиме «оффлайн», т.е. без подключения к сети Интернет (с помощью программного продукта OpenServer данная информационная система не зависит от подключения к сети Ethernet. Этот аспект является очень важным, так как при отсутствии сетевого соединения риск утечки информации является минимальным);
 - разнообразие материалов (собрана информация и пособия по обучению специалистов всех уровней в виде тестового, видео- и фотоматериала, созданы итоговые тесты на основе данных материалов);
 - открытость и простота редактирования информационной системы (любой пользователь с помощью изучения пособий по рабочей среде «Joomla!» сможет добавлять нужный материал или удалять тот, который уже потерял актуальность. В данной информационной системе можно редактировать данные без изменения кода программы, т.е. для изменения данных не обязательно уметь программировать);

– неограниченное количество добавляемых файлов и возможность обновлений (добавлений) новых данных (материалов и пунктов меню можно создавать сколько угодно. Даже учитывая это, многофункциональная информационная система «Наставник» может работать и на довольно слабых компьютерах, что является большим плюсом).

Использование многофункциональной информационно-справочной системы «Наставник» для управления данными методической, научной и преподавательской деятельности позволит значительно упростить поиск обучающих, справочных материалов и систем контроля знаний. Это позволит использовать данную систему в качестве обучения, в роли единой справочной среды, а также для решения информационно-расчетных задач. Такая система при обучении специалистов может использоваться для:

- самоподготовки обучающихся без преподавателя;
- оказания помощи преподавательскому составу при подготовке к проведению занятий;
- проведения контрольных занятий с различными категориями обучаемых методом тестирования;
- поиска и выборки информации по заданным параметрам.

Список использованных источников

1. Норенков, И. П. Автоматизированные информационные системы : учебное пособие / И. П. Норенков. – М. : МГТУ им. Баумана, 2011. – 342 с.
2. Информационные системы и технологии : научное издание / под ред. Ю. Ф. Тельнова. – М. : ЮНИТИ, 2016. – 303 с.
3. Агальцов, В. П. Базы данных : учебник : в 2-х т. Т. 1. Локальные базы данных / В. П. Агальцов. – М. : ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 352 с.

В. О. Корепанов

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

МОДЕЛИ СТРАТЕГИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКСИИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМАНДЫ

Аннотация. Рассматривается задача формирования команды агентов, целью команды является решение задачи выпуклой оптимизации. Вводятся неопределенность о поведении оппонентов и модели стратегической рефлексии (представления о поведении оппонентов). Исследуются возможности таких моделей для достижения цели команды.

STRATEGIC THINKING MODELS FOR TEAM FORMATION PROBLEM

V. O. Korepanov

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia)

Abstract. The problem of forming a team of agents is considered, the goal of the team is to solve the convex optimization problem. Uncertainty about the behavior of opponents and a model of strategic reflection (ideas about the behavior of opponents) are introduced. We study the possibilities of such models to achieve the goal of the team.

Введение. Рассмотрим задачу формирования команды, предложенную в [1]. Задано множество агентов $N = \{1, 2, \dots, n\}$. Каждый агент выбирает действие $y_i \geq 0$, неся при этом затраты $c(y_i, r_i)$, где r_i – тип агента, отражает его эффективность (или тип функции затрат). Цель совместных действий агентов состоит в достижении суммарного действия

$$\sum_{i \in N} y_i = R, \quad (1)$$

при минимальных суммарных затратах

$$\sum_{i \in N} c(y_i, r_i) \rightarrow \min_{\{y_i \geq 0\}}. \quad (2)$$

Без ограничения общности будем считать $R = 1$. В случае затрат вида Кобба–Дугласа $c(y, r) = y^\alpha r^{1-\alpha} / \alpha$, решение задачи (1), (2) выглядит так:

$$y_i^* = R^* r_i / \sum_j r_j. \quad (3)$$

В работе [2] предложена модель динамики формирования взаимных представлений агентов о типах друг друга, т.е. динамики информационной рефлексии (далее ИР). При этом считается, что агенты могут решить задачу (1), (2) и на основании решения восстанавливают такие представления о типах оппонентов, которые способны объяснить наблюдаемые действия оппонентов. В данной работе совершается попытка использовать подход стратегической рефлексии [3]: агенты знают типы друг друга, но не знают точно модели поведения друг друга. Иными словами, передать числовую информацию о своих типах друг другу они могут, а быть уверенными в том, что каждый решает и(или) способен решить оптимизационную задачу (1), (2) они не могут, в противоположность подходу, использованному в [2].

Модели стратегической рефлексии. Рассмотрим сначала простейшую модель стратегической рефлексии (СР). Пусть есть множество N^0 «простых»

агентов – так называемые агенты нулевого ранга рефлексии. Будем считать, что агенты 0 ранга знают общее число агентов n и пусть они выбирают своим действием $y_i^0 = 1/n$.

Если все агенты 0 ранга, то их действия удовлетворяют (1), но критерий (2) не оптимален. Пусть есть «умные» агенты – агенты ранга 1, которые знают решение (1), (2), знают, что есть агенты 0 ранга, но им точно не известно их число и число агентов 1 ранга. Обозначим n^0 – число агентов 0 ранга, N^1 – множество агентов 1 ранга, n_i^{10} – представления i -го агента ранга 1 о числе агентов ранга 0 и n_i^{11} – представления о числе агентов 1 ранга и N_i^{11} – представления о множестве агентов 1 ранга. Тогда действие агента ранга 1 будет

$$y_i^1 = \left(1 - n_i^{10}/n\right) r_i / \sum_{j \in N_i^{11}} r_j.$$

Если процесс выбора действий происходит в форме повторяющейся игры, а агенты наблюдают все действия на прошлом шаге $y(t-1) = (y_1(t-1), \dots, y_n(t-1))$, то они могут найти множество N^0 (это агенты, у которых действие равно $1/n$), понять, что остальные – агенты 1 ранга, и тем самым за одно наблюдение прийти к истинному представлению о рангах агентов. На следующем шаге действия агентов 1 ранга будут оптимальны с учетом наличия агентов 0 ранга:

$$y_i^1 = \left(1 - n^0/n\right) r_i / \sum_{j \in N^1} r_j.$$

В рассмотренном примере, во-первых, в общем случае не достигается оптимум решения задачи (1), (2), во-вторых, в случае, если агенты наблюдают только агрегат действий $(\sum_{i \in N} y_i(t-1))$, то восстановить точные представления о параметрах оппонентов становится практически невозможно – возникает дискретная переборная задача с возможно не единственным решением.

Построенная модель СР не приводит к решению (1), (2), в том числе из-за того, что агенты 0 ранга выбирают фиксированное, в общем случае, неоптимальное действие. Попытаемся сделать так, чтобы игрок 0 ранга менял свое действие. Рассмотрим динамическую модель стратегической рефлексии, построенную на идее индикаторного поведения [3]. Заданы начальные действия агентов $y_i(0)$. Агент 0 ранга наблюдает сумму действий агентов на прошлом шаге и смещает свое действие в сторону действия, при котором удовлетворялось бы (1) при неизменных действиях остальных:

$$y_i(t+1) = (1 - \gamma_i) y_i(t) + \gamma_i \left(1 - \sum_{j \neq i} y_j(t)\right) = y_i(t) + \gamma_i \left(1 - \sum_{j \in N} y_j(t)\right), \quad (4)$$

где $\gamma_i \in [0, 1]$ – величина шага в сторону удовлетворения (1)

Если агент 1 ранга считает всех остальных агентами 0 ранга, знает модель (4) и, соответственно, может предсказать их действия, тогда в стремлении к (1) его действием будет

$$y_i^1(t+1) = y_i^1(t) + \gamma_i \left(1 - \sum_{j \neq i} y_j(t+1) - y_i^1(t) \right).$$

Пусть агент 1 ранга считает, что есть N_i^{10} агентов 0 ранга, а остальные 1 ранга и агенты 1 ранга знают решение (3), тогда логично, что агенты 1 ранга будут стремиться к решению (3) с учетом наличия агентов 0 ранга:

$$y_i^1(t+1) = (1 - \gamma_i) y_i^1(t) + \gamma_i \left(1 - \sum_{j \in N_i^{10}} y_j^0(t+1) \right) \frac{r_i}{\sum_{j \in N/N_i^{10}} r_j}. \quad (5)$$

Модель поведения агентов ранга 2 и выше аналогична (5), за тем исключением, что у таких агентов должны быть представления о числе оппонентов ранга ниже своего, например, пусть N_i^{20} и N_i^{21} – множества агентов ранга 0 и 1 в представлении агента i ранга 2. Тогда его действие рассчитывается по выражению

$$y_i^2(t+1) = (1 - \gamma_i) y_i^2(t) + \gamma_i \left(1 - \sum_{j \in N_i^{20}} y_j(t+1) - \sum_{j \in N_i^{21}} y_j^1(t+1) \right). \quad (6)$$

Не забудем, что стоит задача (1), (2), для которой мы пытаемся использовать стратегическую рефлексию. В общем случае у построенной модели динамики возникает две проблемы: условия сходимости динамики (4) – (6) и задача сходимости именно к решению (1), (2).

Пусть есть только агенты 0 ранга и $\gamma_i = 1$. Тогда $y_i(t+1) = 1 - \sum_j y_j(t)$. Из такой динамики следует $y_i(t) = y_j(t)$ для $t > 0$, в общем случае эта динамика расходящаяся, а единственная неподвижная точка $y = (1/(n+1), \dots, 1/(n+1))$, к которой динамика может прийти (за один шаг), если $\sum_i y_i(0) = n/(n+1)$. В любом случае эта неподвижная точка не является решением (1), (2).

Заметим, что если $\sum_i \gamma_i = 1$, то действия агентов ранга 0 удовлетворяют (1):

$$\sum_i y_i(t+1) = \sum_i y_i(t) + \sum_i \gamma_i \left(1 - \sum_i y_i(t) \right) = 1.$$

Тогда получается, что динамика (4) остановится на первом шаге. Зная решение (3), получаем, что эти действия на 1 шаге будут удовлетворять (2), если

$$\forall i: \left(y_i(0) - r_i / \sum_j r_j \right) / \gamma_i = \sum_j y_j(0) - 1. \quad (7)$$

Заметим, что правая часть (7) не зависит от i .

В частности, при $\gamma_i = r_i / \sum r_j$ из (7) получаем

$$y_i(0) / \sum_j y_j(0) = r_i / \sum_j r_j. \quad (8)$$

Таким образом, для решения задачи (1), (2) важно точно знать типы агентов и настроить параметры и первые действия динамики (4) в соответствии с (8).

Интересно далее рассмотреть возможности решения (1), (2) с введением агентов 1 и более высокого рангов.

Рассмотрим также другую модель стратегической рефлексии, в которой агенты 0 ранга действуют также по (4). А агенты 1 ранга знают решение (3) и пытаются своими действиями привести остальных к нему, т.е. это агенты, которые пытаются управлять остальными агентами.

Рассмотрим частные случаи при $\gamma_i = 1$ и $n = 3$. Пусть сначала у нас 1-й агент ранга 0, а 2-й и 3-й агенты ранга 1. Тогда при $y_2(0) = y_2(1) = y_2^*$ и $y_3(0) = y_3(1) = y_3^*$, действие первого игрока на первом шаге $y_1(1) = 1 - y_2^* - y_3^* = y_1^*$, т.е. два «умных» агента могут сформировать команду с одним «глупым» агентом.

Рассмотрим далее случай с одним «умным» агентом 3 и двумя агентами 0 ранга: 1-м и 2-м. Действия агентов 1 и 2 на первом шаге: $y_i(1) = 1 - y_{3-i}(0) - y_3(0)$, на последующих шагах после несложных преобразований получаем следующее общее выражение для 1 и 2 агента:

$$y_i(t) = y_i(t-2) + y_3(t-2) - y_3(t-1)$$

0	1	2	3	4
$y_1(0)$	$1 - y_2(0) - y_3(0)$	$y_1(0) + y_3(0) - y_3(1)$	$1 - y_2(0) - y_3(0) + y_3(1) - y_3(2)$	
$y_2(0)$	$1 - y_1(0) - y_3(0)$	$y_2(0) + y_3(0) - y_3(1)$	$1 - y_1(0) - y_3(0) + y_3(1) - y_3(2)$	
$y_3(0)$	$y_3(1)$	$y_3(2)$	$y_3(3)$	$y_3(4)$

Агент 3 должен выбрать так свои действия, чтобы $y(t) = (y_1(t), y_2(t), y_3(t))$ сошлись к y^* и сошлись как можно быстрее, при этом с некоторого $T \geq 0$: $\forall t \geq T : y_3(t) = y_3^*$.

Для случая $T = 0$: $y_i(2t) = y_i(0)$, $y_i(2t+1) = 1 - y_{3-i}(0) - y_3^*$. Для схождения необходимо $y_1(0) = 1 - y_2(0) - y_3^*$, т.е. $y_1(0) + y_2(0) + y_3^* = 1$. Тогда для схождения к решению необходимо $y_1(0) = y_1^*$, $y_2(0) = y_2^*$, что подразумевает изначальное знание решения (1), (2).

Для случая $T=1$ агент 3 должен определить $y_3(0)$, а далее $\forall t \geq 1$: $y_3(t) = y_3^*$. Получаем следующие соотношения: для $t \geq 1$: $y_i(2t) = y_i(0) + y_3(0) - y_3^*$, $y_i(2t+1) = 1 - y_{3-i}(0) - y_3(0)$. Для схождения необходимо: $y_3(0) = (1 - y_2(0) - y_3(0) + y_3^*) / 2$. Для схождения к решению (3) необходимо выполнение условия

$$y_1(0) - y_2(0) = y_1^* - y_2^* \quad (9)$$

Мы рассмотрели две модели использования стратегической рефлексии для задачи формирования команды. Проанализированы их некоторые частные случаи, получены условия для формирования команды, например (7) и (9).

Интересным кажется анализ предложенных моделей СР в более общих случаях, в том числе, и их численный анализ. Далее интересно их сравнение, например, с распределенным алгоритмом оптимизации ADMM [4], а также варианты применения в нем стратегической рефлексии.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 17-07-01550 А.

Список использованных источников

1. Burkov, V. N. et al. Introduction to theory of control in organizations. – CRC Press, 2015.
2. Novikov, D. A. Teams: Building, Adaptation and Learning // New Frontiers in Information and Production Systems Modelling and Analysis. Springer, Cham. – 2016. – P. 3 – 34.
3. Novikov D. A., Korepanov V. O. The reflexive partitions method in models of collective behavior and control // Automation and Remote Control. – 2012. – V. 73, № 8. – P. 1424 – 1441.
4. Boyd S., Parikh N., Chu E., (2011) Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers // Foundations and Trends in Machine Learning. – 2011. – V. 3, № 1. – P. 1 – 122.

А. А. Шишкин, К. А. Меркушова

(Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ И РАЗВИТИЯ МОДЕЛЕЙ ПОСТРОЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ОСВОЕНИЯ ОПЕРАТОРОМ ЭРГОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. Дается общее описание разработанных моделей построения индивидуальной траектории освоения оператором эрготехнической системы на основе компетентного подхода. Рассматриваются перспективы применения и развития разработанных моделей.

PROSPECTS FOR APPLICATION AND DEVELOPMENT OF MODELS FOR CONSTRUCTING AN INDIVIDUAL TRAJECTORY OF DEVELOPMENT BY THE OPERATOR OF THE ERGOTECHNICAL SYSTEM

Abstract. A general description is given of the developed models for constructing an individual trajectory for the operator to master the ergotechnical system based on the competency-based approach. The prospects of application and development of the developed models are considered.

Анализ систем обучения и подготовки организаций, предоставляющих возможность освоения оператором эрготехнической системы (ЭТС), показал наличие существенных недостатков в данных системах, таких как узкая специализация, недостаточное использование средств вычислительной техники и современных математических методов, а также в процессе освоения не учитываются индивидуальные личностные характеристики оператора.

Ввиду вышеперечисленного были разработаны модели построения индивидуальной траектории освоения оператором ЭТС, применение которых в процессе освоения позволяет повысить его качество и сократить время, требуемое на освоение оператором ЭТС.

В ЭТС оператор выступает в роли эрготехнического элемента (ЭЭ) системы, управляющего техническим средством (ТС). Деятельность ЭЭ в контуре управления функционированием ТС рассматривается как процесс преобразования некоторого исходного состояния технической системы в состояние, обеспечивающее выполнение функциональных задач с требуемым качеством [1].

Для успешного выполнения своей рабочей деятельности в роли ЭЭ оператору необходимо освоить ЭТС до требуемого уровня, т.е. соответствовать необходимым показателям ЭЭ данной системы.

Разработанные модели построения индивидуальной траектории освоения оператором ЭТС основаны на компетентностном подходе, согласно которому процесс освоения оператором ЭТС считается завершенным, когда у оператора ЭТС сформированы все необходимые компетенции:

$$K_{\text{тр}} \subseteq K_{\text{тек}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{тр}}$ – множество требуемых (необходимых) компетенций; $K_{\text{тек}}$ – множество текущих компетенций оператора ЭТС.

Множество требуемых компетенций оператора ЭТС является одним из необходимых показателей ЭЭ. Еще одним показателем ЭЭ является множество личностных характеристик оператора (C_0). Таким образом, множество показателей ЭЭ выглядит следующим образом:

$$O = \{K_{\text{тек}}, C_0\}. \quad (2)$$

Освоение оператором ЭТС достигается путем информационного воздействия на него, множество возможных видов которого определяется как A :

$$A = \{F, H, V\}, \quad (3)$$

где F – множество форм освоения; H – множество методов освоения; V – множество форм контроля.

Построение индивидуальной траектории освоения оператором ЭТС базируется на функции S , которая выбирает из возможных видов освоения формы, методы освоения и формы контроля, исходя из личностных характеристик оператора:

$$S = f(A, C_O). \quad (4)$$

Результаты функции S передаются в функцию изменения состояния оператора T :

$$T = f(K_{\text{тек}}, K_{\text{тр}}, S). \quad (5)$$

Таким образом, обеспечивается выполнение выражения (1). Выражения (1) – (5) являются основой аналитической модели построения индивидуальной траектории освоения оператором ЭТС.

Построение индивидуальной траектории освоения ЭТС помогает оператору достичь наиболее эффективных результатов [2 – 7], однако управление данным процессом человеком весьма затруднительно, ввиду чего для решения этой задачи целесообразно использовать средства вычислительной техники, которые также позволяют незатруднительно собирать статистику результатов освоения операторов ЭТС, их личностных характеристик и производить централизацию этих данных. Благодаря централизации данных о результатах освоения ЭТС операторы получают возможность сравнивать свои результаты с результатами других операторов, что повышает их мотивацию за счет соревновательного момента.

Перспективой применения разработанных моделей по прямому назначению является их внедрение в системы обучения и подготовки организаций, предоставляющих возможность освоения оператором ЭТС, таких как учреждения высшего и среднего профессионального образования, организаций, специализирующихся на обучении и подготовке операторов ЭТС, а также организаций, проводящих подготовку операторов для дальнейшего приема на работу.

Альтернативной перспективой является создание универсальной системы освоения оператором ЭТС на основе разработанных моделей с ее дальнейшей полной автоматизацией.

Разработанные модели также актуальны при освоении оператором другой подобной системы, где нет четкого алгоритма действий оператора, например, при освоении программистом среды разработки.

Перспективой централизации данных о результатах освоения операторами ЭТС является возможность оценки ситуации на рынке труда в данной

области, возможность определения в численном виде конкурентоспособности операторов ЭТС, а также других рыночных факторов [8].

Анализ статистики личностных характеристик операторов позволяет сформировать на основе статистики результатов освоения аналитическую модель оператора, наиболее восприимчивого к освоению определенной ЭТС. Данная модель дает возможность заранее спрогнозировать эффективность освоения оператором ЭТС.

Перспективы применения разработанных моделей в других сферах являются результатом реализации возможности адаптации предоставляемой информации и способа предоставления к личностным характеристикам и предпочтениям человека. Данную возможность целесообразно использовать при создании и применении таргетированной рекламы, информационных порталов, систем управления контентом и др.

Таким образом, разработанные модели освоения оператором ЭТС имеют множество перспектив применения и развития как в своей предметной области, так и в других сферах деятельности.

Список использованных источников

1. Моделирование информационного воздействия на эргатический элемент в эрготехнических системах / В. В. Алексеев и др. – М. : СТЕНСВИЛ, 2003. – 200 с.

2. Алексеев, В. В. Адаптивная информационная технология подготовки операторов систем специального назначения на основе компетентностного подхода / В. В. Алексеев, А. А. Шишкин // Правовая информатика. – 2018. – № 13. – С. 60 – 69.

3. Сысоев, П. В. Обучение по индивидуальной траектории / П. В. Сысоев // Язык и культура. – 2013. – № 4. – С. 121 – 131.

4. Толочек, В. А. Стили деятельности: Модель стилей с изменчивыми условиями деятельности / В. А. Толочек. – М. : Измайлово, 1992. – 77 с.

5. Холодная, М. А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума / М. А. Холодная. – 2-е изд., перераб. – СПб. : Питер, 2004. – 384 с.

6. Корнилова, Т. В. Подходы к изучению когнитивных стилей: двадцать лет спустя / Т. В. Корнилова, Г. В. Парамей // Вопросы психологии. – 1989. – № 6. – С. 140 – 147.

7. Микерова, Г. Ж. Алгоритм построения индивидуальной образовательной траектории обучения / Г. Ж. Микерова, А. С. Жук // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 11-1. – С. 138 – 142.

8. Козачек, А. В. Технология математического моделирования в процессе проектирования содержания профессиональной инженерно-экологической подготовки / А. В. Козачек // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21. – С. 197 – 206.

Б. А. Болдышев

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

ДИСКРЕТНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОСТЫХ НЕРВНЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Разработана дискретная модель, представляющая собой сеть пороговых элементов, сходных с нейронами МакКаллока-Питтса, но имеющих ряд дополнительных, биологически инспирированных свойств. Исследуется возможность применения данной модели для симуляции активности нервной системы моллюска.

B. A. Boldyshev

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia)

DISCRETE APPROACH IN SIMULATING SIMPLE NERVOUS SYSTEMS

Abstract. A discrete model has been developed, represented by a network of threshold elements similar to McCulloch-Pitts neurons, but having a number of additional, biologically inspired features. The possibility of using this model to simulate the activity of the mollusk's nervous system is investigated.

Введение. Существующие модели биологических нейронов главным образом нацелены на описание динамики электрического потенциала на мембране клетки при помощи систем дифференциальных уравнений. Эти модели делят на два класса: биофизически точные и феноменологические. Первые описывают реальные процессы мембраны, вызывающие изменение потенциала. Феноменологические модели описывают изменение мембранного потенциала безотносительно его причин. Основой точных моделей является модель Ходжкина–Хаксли [1], имеющая множество различных модификаций, наиболее известные описаны в [2 – 4]. Самые распространенные феноменологические модели обобщенно называют Integrate and fire [5].

Предлагаемая нами модель основана на дискретной математике и позиционируется как феноменологическая. Мы опускаем многие детали и не стремимся к биологической интерпретируемости параметров модели. Целью является воспроизведение периодов активности и молчания нейронов в синхронизированных сетях, в частности, воспроизведение ритмической активности. Модель отличается от существующих дискретным подходом и учетом

мультитрансмиссивности. Последнее означает, что нейроны используют разнообразные химические молекулы для передачи сигналов. Поэтому сигналы нейронов имеют небинарный характер (возбуждение-торможение) и могут вызывать широкий спектр эффектов в своих мишенях.

Методы. Используется асинхронная дискретная модель с событийным временем, описанная в [6]. Нейроны из множества $\mathbf{N} = \{N_1, \dots, N_n\}$ обмениваются сигналами-трансмиссиверами из множества $\mathbf{C} = \{c_1, \dots, c_m\}$. Нейроны функционируют в непрерывном времени \mathbf{T} , в котором происходят события. События – это точки на непрерывной шкале времени, которые нумеруются натуральными числами $0, 1, 2, \dots$ и разбивают шкалу на такты. Такт t – это полуинтервал $[t, t + 1)$, который ограничен событиями t и $t + 1$. Событие, произошедшее в момент $T(t)$, является началом такта t длительностью $\tau(t)$, такой, что

$$T(t) = \sum_{i=0}^{t-1} \tau(i). \quad (1)$$

Внутри такта никаких событий не происходит, и все параметры системы остаются постоянными. Каждый нейрон N_i обладает мембранным потенциалом (МП) $U_i(t) \in [U_i^{\min}, U_i^{\max}]$. На такте t нейрон может находиться в активном или пассивном состоянии, обозначаемом $y_i(t) \in \{0, 1\}$, $y_i(t) = 1$, если нейрон активен. В отсутствие внешнего воздействия мембранный потенциал всегда принадлежит отрезку $U_i^0 \leq U_i(t) \leq U_i^{\max}$, где $U_i^0 > U_i^{\min}$. Если мембранный потенциал принимает значение выше порога U_i^{th} , нейрон N_i активен:

$$y_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_i(t) \geq U_i^{th}; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2)$$

Смена состояния активности любого нейрона, и только она, порождает событие.

Передача сигналов между нейронами осуществляется посредством общего внеклеточного пространства (ВКП) $X(t) = \{x_1(t), \dots, x_m(t)\}$. Если нейрон N_i активен на такте t , он выбрасывает в ВКП дозу d_{ij} одного трансмиссивера из множества \mathbf{C} . Стандартные дозы всех нейронов задаются матрицей $D = \|d_{ij}\|_{n \times m}$. Концентрация трансмиссивера в ВКП на такте t определяется формулой

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^n d_{ij} y_i. \quad (3)$$

Каждый нейрон подвержен влиянию трансмиссиверов, находящихся в ВКП. Влияние трансмиссивера на i -й нейрон определяется весом $w_{ij} \in \mathbb{R}$. Веса всех нейронов ко всем трансмиссиверам задаются матрицей $W = \|w_{ij}\|_{n \times m}$.

В течение такта t мембранный потенциал нейрона N_i изменяется с постоянной скоростью

$$v_i(t) = s_i(t) + v_{ien}^\alpha(t), \quad (4)$$

где

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j(t), \quad (5)$$

и v_{ien}^α – эндогенная скорость изменения МП; α – переменный параметр, зависящий от типа электрической активности нейрона и интервала, в котором находится МП в текущий момент. Типов электрической активности три: осцилляторный, тонический и реактивный. Нейрон-осциллятор в отсутствии внешних воздействий периодически активизируется и замолкает, тонический – всегда активен, реактивный – всегда молчит. Формально механизм изменения эндогенной скорости, а также алгоритм вычисления следующего состояния системы описаны в [6]. Программная реализация алгоритма выполнена на языке Python 3 и находится в открытом доступе [7].

Результаты. Модель применялась для симуляции активности нейронов морского моллюска аплизии, ответственных за пищевое поведение. В ее ротовой полости находится орган для соскабливания и перетирания водорослей – радула. Радула совершает 2 типа движений: выдвигание/втягивание в ротовую полость и открытие/закрытие. Если радула закрыта во время выдвигания, аплизия выплевывает пищу, если радула закрыта во время втягивания – глотает. Нервная система аплизии способна быстро переключаться между этими поведением. Клеточные механизмы переключения подробно изучены биологами [8]. Есть две группы нейронов (назовем их условно P1 и P2), которые управляют фазами выдвигания и втягивания радулы соответственно, их активность при переключении неизменна. Другая группа нейронов (E1/E2) активна во время выплевывания и активизирует мотонейроны (V), закрывающие радулу в фазе выдвигания. Мотонейроны закрывания также испытывают воздействие от нейронов выдвигания/втягивания, побуждающие закрываться в фазе втягивания, но это воздействие более слабое. Если затормозить E1/E2, влияние P1/P2 на V начнет проявляться, радула будет закрываться в фазе втягивания – пищевое поведение сменится на поглощение. Работой E1/E2 управляют командные нейроны C1 и C2, соответственно активирующие и тормозящие их. Результаты симуляции показаны на рис. 1.

Каждая из групп P1, P2, E1 и E2 представлена обобщенным модельным нейроном. Красным цветом обозначены нейроны, активные в фазе выдвигания, синим – в фазе втягивания. Моторный нейрон V в процессе работы меняет фазу активности, с чем и связано переключение пищевого поведения.

Выводы. Предложенная модель имеет интуитивно понятные параметры, позволяющие быстро подобрать тип эндогенной активности модельного нейрона в соответствии с его биологическим прототипом. Простота модели сильно ограничивает возможности биологической интерпретации ее параметров. Однако пример с аплизией показывает, что подход применим в случаях, где важно зафиксировать само наличие активности нейрона, а интенсивность и паттерн не важны.

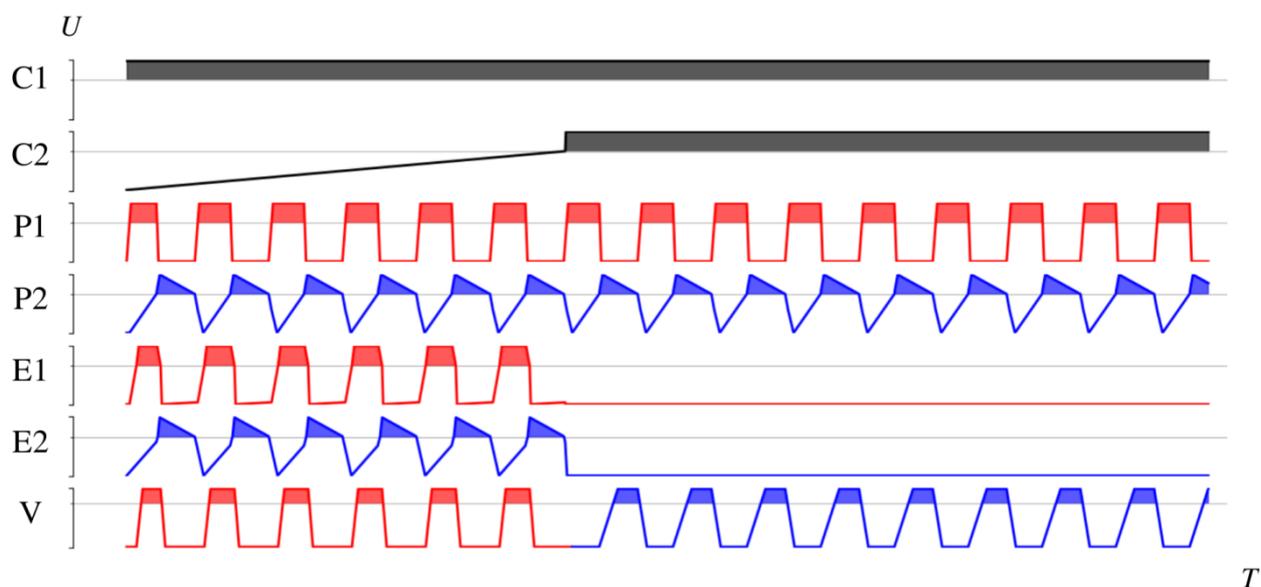


Рис. 1. Графики зависимости мембранных потенциалов семи модельных нейронов от времени

Мультитрансмиттерная парадигма позволяет рассматривать как случаи синаптической, так и объемной передачи сигнала [9, 10], когда химический сигнал распространяется за пределы синаптической щели и начинает воздействовать на множество мишеней, достигаемых диффузией во внеклеточное пространство. Преимущества этого подхода на текущем этапе работы не раскрыты в полной мере, так как в модели воздействие любого трансмиттера сводится к изменению мембранного потенциала нейрона, тогда как в действительности могут изменяться и другие характеристики, например, вес рецептора, выброс трансмиттера или тип эндогенной активности [11]. Расширение набора параметров нейрона, подверженных изменению под действием трансмиттера, – наша ближайшая задача.

Список использованных источников

1. Hodgkin A. L., & Huxley A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of physiology*, 117(4), 500 – 544.
2. Fitz Hugh, R. (1969). Mathematical models of excitation and propagation in nerve. *Biological engineering*, 1 – 85.
3. Nagumo J., Arimoto, S., & Yoshizawa S. (1962). An active pulse transmission line simulating nerve axon. *Proceedings of the IRE*, 50(10), 2061 – 2070.
4. Morris, C., & Lecar, H. (1981). Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber. *Biophysical journal*, 35(1), 193 – 213.
5. Abbott, L. F. (1999). Lapique's introduction of the integrate-and-fire model neuron (1907). *Brain research bulletin*, 50(5–6), 303–304.

6. Асинхронная дискретная модель химических взаимодействий в простых нейронных системах / О. П. Кузнецов, Н. Базенков, Б. А. Болдышев и др. // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2018). – № 2. – С. 3 – 20.
7. Boldyshev, B. (2019) Asynchronous-network. URL: <https://github.com/Boldyshev/asynchronous-network>
8. Jing, J., & Weiss, K. R. (2001). Neural Mechanisms of Motor Program Switching in Aplysia. *Journal of Neuroscience*, 21(18), 7349 – 7362.
9. Agnati, L. F., Guidolin D., Guescini M., Genedani S., & Fuxe, K. (2010). Understanding wiring and volume transmission. *Brain research reviews*, 64(1), 137 – 159.
10. Дьяконова, В. Е. Нейротрансмиттерные механизмы контекст-зависимого поведения / В. Е. Дьяконова // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. – 2012. – № 62(6). – 664 с.
11. Katz, P. S. (Ed.). (1999). *Beyond neurotransmission: neuromodulation and its importance for information processing*. New York : Oxford University Press.

А. А. Коробов, С. В. Фролов, Н. Э. Алиев
(Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯЦИИ СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Аннотация. Описана математическая модель сердечно-сосудистой системы человека с учетом процессов регуляции. В модели рассматривается регуляция трех функциональных систем кровообращения – сердечного выброса, тканевого кровотока и артериального давления.

A. A. Korobov, S. V. Frolov, N. E. Aliev
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

MODELING HUMAN BLOOD CIRCULATION SYSTEM REGULATION

Abstract. A mathematical model of the human cardiovascular system is described taking into account regulatory processes. The model considers the regulation of three functional circulatory systems – cardiac output, tissue blood flow and blood pressure.

Развитие информационных технологий дало огромный толчок для применения математических моделей в медицине. Особенно заметно этот тренд проявляется в диагностике сердечно-сосудистых заболеваний. Особый интерес для врачей и исследователей представляют математические модели кровообращения человека.

На сегодняшний день все известные математические модели кровообращения можно классифицировать согласно степени их упрощения сердечно-сосудистой системы, т.е. по параметру размерности – 0D, 1D, 2D и 3D [1].

Для задач интенсивной терапии применимы нульмерные модели (0D), поскольку они обладают набором необходимых свойств для описания системы кровообращения, а также отвечают принципам быстрого действия вычисления и наглядного представления текущего состояния сердечно-сосудистой системы пациента. Эти модели также называют моделями с сосредоточенными параметрами, так как они основаны на упрощенных представлениях компонентов сердечно-сосудистой системы, что в значительной степени способствует пониманию физиологии кровообращения [1].

Не менее важным параметром классификации математических моделей кровообращения является отображение процессов регуляции, т.е. его приспособляемость к изменяющейся функциональной активности и метаболическим потребностям органов и тканей организма. Большинство известных моделей кровообращения описывают гемодинамику сердечно-сосудистой системы, зачастую, не затрагивая процессы регуляции, что делает невозможным их применение для диагностики и исследований в палатах интенсивной терапии.

Одной из самых полных и проработанных моделей является модель В. А. Лищука [2]. В отличие от классических представлений о сердечно-сосудистой системе, где модель разбивают на неуправляемую часть (объект регулирования) и регуляцию, в модели В. А. Лищука разработана многосвязная саморегуляция функциональных систем организма, состоящая из автономных подсистем саморегуляции.

В модели рассматривается регуляция трех функциональных систем кровообращения – сердечного выброса, тканевого кровотока и артериального давления. Сердечно-сосудистая система представлена в виде четырех резервуаров: бульбарный центр, сердце, артериальный и венозный резервуар и обобщенная капиллярная система тканей.

На кафедре «Биомедицинская техника», на основе модели В. А. Лищука разработана 6-камерная нульмерная динамическая математическая модель сердечно-сосудистой системы (рис. 1), где ЛГС – кровеносные сосуды легочного круга кровообращения, ПС – правое сердце, ЛС – левое сердце, В – венозное русло, А – артериальное русло, МКС – микрососуды большого круга кровообращения, ЭФ – эффекторные звенья (звенья, передающие возбуждающий сигнал к органам и тканям).

На начальном этапе происходит расчет давления для всех камер, кроме левого и правого желудочка по формуле

$$P_i(t) = e_i(V_i(t) - U_i),$$

где e_i – жесткость стенки камеры ($\text{Торр} / \text{см}^3$); U_i – ненапряженный объем крови, расправляющий, но не растягивающий стенки камеры (см^3).

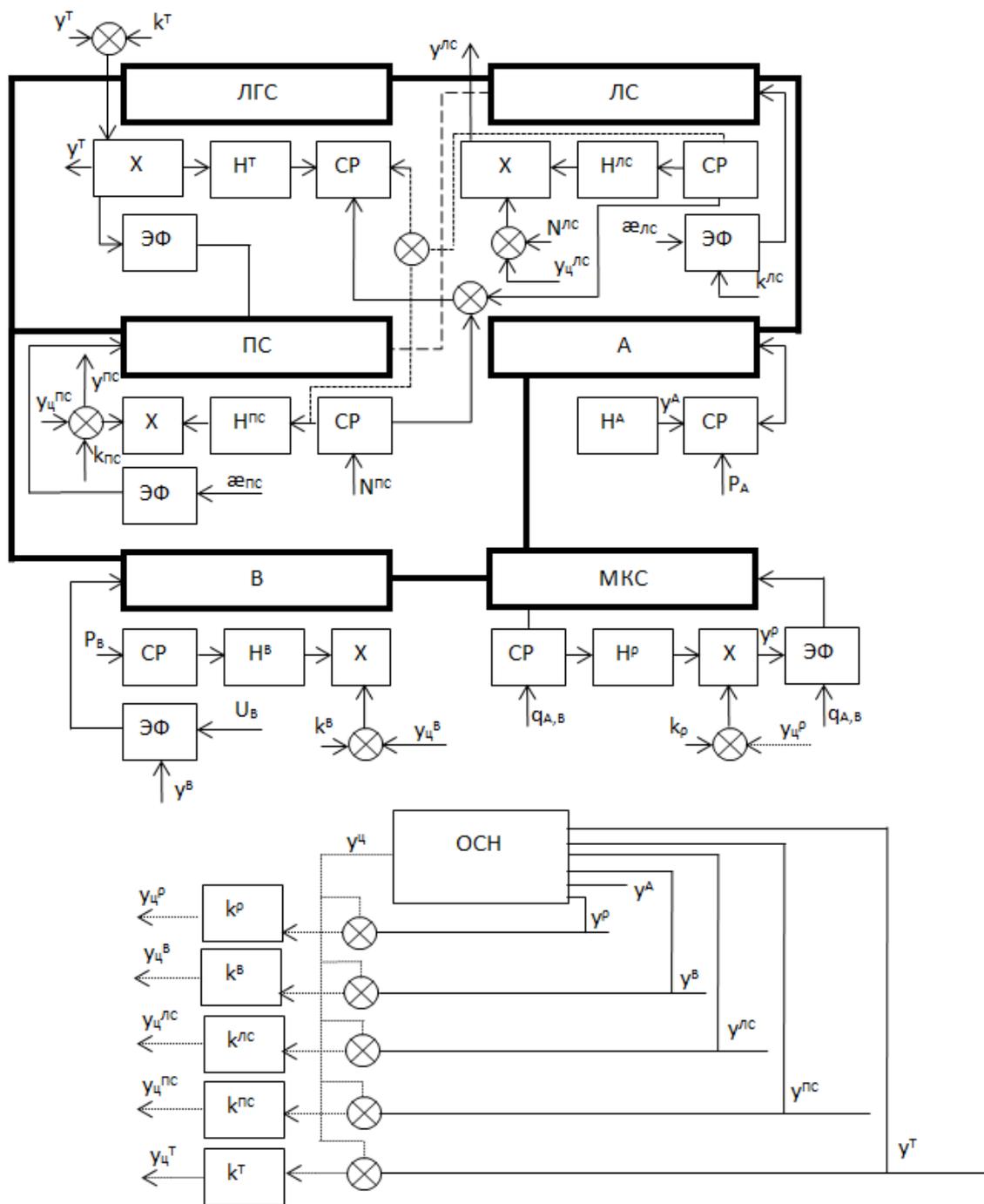


Рис. 1. Модель сердечно-сосудистой системы с регуляцией

Для левого и правого желудочка давление определяется по формуле

$$P_i(t) = 4 \sqrt[3]{\frac{\pi}{6}} \frac{h_i}{\sqrt[3]{V_i(t)}} \left[E_i^{PE} (1-s) (\exp(K_i^{PE} \varepsilon_i(t)) - 1) + E_i^{SE} s (\exp(K_i^{SE} \varepsilon_i^{SE}(t)) - 1) \right],$$

где $\varepsilon^{SE}(t)$ – относительное растяжение последовательного упругого элемента;
 $\varepsilon(t)$ – относительное растяжение элементарной полоски миокарда;
 E^{SE} , E^{PE} , K^{SE} , K^{PE} – параметры, характеризующие упругие свойства миокарда, h_i – толщина стенки.

Производим расчет потоков крови из аорты в правое предсердие, из артерий головы в капилляры головы, из артерий туловища в капилляры туловища, из капилляров туловища в вены туловища, из капилляров головы в вены головы, из вен головы в правое предсердие, из вен туловища в правое предсердие, из легочных артерий в легочные вены, из легочных капилляров в легочные вены, из легочных вен в левое предсердие по формуле

$$q_{\text{ВХ,ВЫХ}}(t) = \rho_{\text{ВХ,ВЫХ}} (P_{\text{ВХ}}(t) - P_{\text{ВЫХ}}(t)),$$

где $\rho_{\text{ВХ,ВЫХ}}$ – проводимость связи ($\text{см}^3 / (\text{Торр} \cdot \text{с})$).

Для кровотоков из аорты в артерии большого круга кровообращения учитываются инерционные свойства крови:

$$\frac{dq_{\text{ВХ,ВЫХ}}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{\text{ВХ,ВЫХ}}} \left(\Delta P_{\text{ВХ,ВЫХ}} - \frac{q_{\text{ВХ,ВЫХ}}(t)}{\rho_{\text{ВХ,ВЫХ}}} \right),$$

$$\Delta P_{\text{ВХ,ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}}(t) - P_{\text{ВЫХ}}(t),$$

где $L_{i,j}$ – инерционность кровотока из камеры i в камеру j ($\text{Торр} \cdot \text{с}^2 / \text{см}^3$).

Основными регуляторными функциями, принятыми в модели, являются гомеостаз артериального давления, регуляция периферического кровотока, центрального венозного давления и насосных свойств сердца.

В качестве подсистем (местных регуляторов) системы регуляции выбраны контуры регуляции периферического кровотока (индекс ρ), артериального (индекс A) и венозного давлений (индекс B), регуляции нагрузок левого и правого сердца (контуры ЛС, ПС, Т). Каждая подсистема моделируется автоматическим регулятором, вход которого получает сигнал о значении регулируемой величины x_i , которыми в модели являются функции кровообращения – кровотоки $q_{A,B}$, давления P_A и P_B , мощности левого $N_{\text{ЛС}}$ и правого $N_{\text{ПС}}$ сердца, N – суммарная мощность сердца.

Управление артериальным давлением осуществляется на уровне центральной регуляции.

Каждый местный регулятор содержит узел сравнения (СР), формирующий нормированный сигнал рассогласования и k_i – коэффициент регулирования. Безразмерные сигналы u_i действуют на управляющие свойства модели кровообращения через эффекторные звенья (ЭФ).

Регулирующими выбраны параметры, которые наиболее сильно влияют на кровообращение. Для сосудистой системы – это общепериферическая проводимость $\rho_{A,B}$ и расправляющий объем вен U_B . Для сердца эффекторные выходы действуют на коэффициенты сокращения желудочков $\alpha_{\text{ЛС}}$, $\alpha_{\text{ПС}}$ и период сердечных сокращений T . Период сердечных сокращений изменяется в соответствии с изменением общей мощности всего сердца.

Центральный уровень регуляции уравнивает напряжения, возникающие в подсистемах местной регуляции. Характеристиками напряженности в подсистемах управления выбраны сигналы u_i , информация о которых поступает в регулятор на центральном уровне, перерабатывается и формируется в управляющие сигналы u_c .

Список использованных источников

1. Подходы к нульмерному моделированию сердечно-сосудистой системы и их использование при оценке мозгового кровообращения / С. В. Фролов, Н. Э. Алиев, А. А. Коробов, С. В. Синдеев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 240 – 248.
2. Лищук, В. А. Математическая теории кровообращения / В. А. Лищук. – М. : Медицина, 1991. – 256 с.

УПРАВЛЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

А. И. Половинкина, Н. Ю. Лесных

(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

ПРОБЛЕМАТИКА РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКОНОМИКИ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Аннотация. Рассмотрена идея концепции устойчивого развития, а также выделены наиболее актуальные и первоочередные шаги для сохранения экологического равновесия при развитии производства и экономики в целом. Акцентируется важность государственного участия и взаимодействия с учеными для решения проблем достижения целей УР.

A. I. Polovinkina, N. Yu. Lesnykh

(Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia)

THE PROBLEMS OF DEVELOPMENT OF ECONOMY IN THE FRAMEWORK OF THE IMPLEMENTATION OF THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT CONCEPT

Abstract. The article considers the idea of the concept of sustainable development, as well as the most relevant and priority steps to preserve the ecological balance in the development of production and the economy as a whole. The importance of state participation and interaction with scientists to solve the problems of achieving the sustainable development goals is emphasized.

«Устойчивое развитие» – эфемерное понятие, или реально работающая и эффективная концепция, необходимая для успешного развития компаний, городов, стран и человечества в целом? Для того, чтобы внести некоторую ясность в этот непростой вопрос, обратимся к сущности данного термина и определим его ключевые аспекты.

Словосочетание «устойчивое развитие» впервые было выделено в 1972 году в ходе Первой Всемирной конференции по окружающей среде, а в 1992 году на конференции ООН понятие уже получило более точную трактовку, согласно которой под устойчивым развитием понималась концепция, призванная преодолеть одну из важнейших для человечества проблем – экологическую, связанную с нерациональным расходом невозобновимых природных ресурсов, перенаселением и загрязнением окружающей среды. В течение последующих лет мировая общественность углублялась в изучение и разработку данной концепции и предлагала новые методологии, позволяющие сделать концепцию УР не только формально определенной, но и объективно способной достигать поставленных целей, ориентированных на долгосрочное развитие. На данный момент базой для решения проблем, выделенных в ходе формулировки концепции УР, является резолюция Генеральной Ассамблеи ООН от 25 сентября 2015 года. Данный документ включает в себя 17 целей в сфере УР, которые охватывают широкий спектр наиболее острых проблем человечества, 169 задач, непосредственно связанных с ними, и 230 индикаторов, позволяющих отслеживать изменения и преобладающие тенденции [1].

Ввиду того, что данный документ носит рекомендательный характер и, преимущественно, только констатирует имеющиеся проблемы, ранжируя их по приоритетности, каждая, заинтересованная в реализации концепции УР страна дополнительно адаптирует, вписывая в национальный контекст, документ, приятый ООН, в соответствии с экономическими, экологическими и социальными реалиями, существующими в данный момент в том или ином государстве. В России решением данной задачи занимался «Аналитический центр при правительстве Российской Федерации», результаты работы были отражены в докладе о человеческом развитии в РФ: «Цели устойчивого развития ООН и Россия».

Изучая принципы концепции УР, рассматривая ЦУР и определенные в их рамках задачи, а также учитывая проблемы, с которыми сталкивается государство, бизнес-сообщества и общественность в целом, встает важнейший вопрос: какие меры необходимо принимать, чтобы рост производства и экономики, в том числе за счет промышленного сектора, не был осуществлен ценой потери экологического равновесия и разрушения экосистем?

Со стороны государства наиболее важной задачей на данный момент является разработка и принятие точной, корректной и более совершенной нормативно-правовой базы для регулирования вопросов природопользования.

Несмотря на ч. 1 ст. 9 и ст. 42 Конституции РФ, большинство правовых документов в области экологии и устойчивого развития вплоть до 2008 года носили преимущественно декларативный характер. Также следует признать, что принятые в 2006 году поправки в Градостроительный кодекс и нововведения в Лесном и Водном кодексах РФ в значительной мере негативно сказались на природоохранной политике РФ, так как в данных документах природные недра рассматривались в большей степени как ресурсы, а не как элементы окружающей среды, требующие, прежде всего, надзора и охраны.

Лишь с января 2008 года, после выступления президента РФ на специальном заседании Совета безопасности, начался фактический процесс реформирования системы государственного контроля и охраны природного фонда РФ. Были утверждены «Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года», на их базе был разработан план действий и принят ряд федеральных законов: № 331-ФЗ, № 287-ФЗ и т.д. [2].

Несмотря на то, что в последнее время органы государственной власти уделяют все больше внимания данной проблеме, о чем свидетельствует принятие таких документов, как: приказ Минприроды России от 14.06.2018 № 261 «Об утверждении формы отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля»; Приказ Минприроды России от 11.10.2018 № 510 «Об утверждении формы заявки на получение комплексного экологического разрешения и формы комплексного экологического разрешения»; Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 29.07.2018) «Об охране окружающей среды» и т.д., следует помнить, что фактическая реализация вышеперечисленных и иных нормативных актов требует постоянного надзора и регулирования со стороны государства, а механизм осуществления данных операций пока находится на стадии становления и требует колоссального внимания и контроля властей [3].

Еще одной из наиболее острых проблем на сегодняшний день является параллельность научных разработок, в поддержку принятия решений по данному вопросу, и государственного управления.

На данный момент учеными предложен широкий спектр инструментов, позволяющих реализовывать ЦУР наиболее эффективно. Так, например, Г. А. Угольницкий в своих работах не только формализовано описал базовую дискретную модель управления устойчивым развитием «ЦЕНТР-АГЕНТ», но конкретизировал ее для различных методов иерархического управления, а именно для принуждения, побуждения и убеждения. Ученый также сформулировал задачу управления иерархической динамической системой и адаптировал ее применительно к иерархически управляемым экосистемам (ИУЭС), благодаря чему стало возможным нахождение оптимального решения, приво-

дящего к гомеостатическому развитию, при котором эффективная экономико-производственная деятельность не идет вразрез с экологическими нормами. В общем виде задача ИУЭС отражена в формулах (1) – (8).

$$x(t) \in \Omega, t = 1, 2, \dots, T \text{ – условие «экологического императива»}; \quad (1)$$

$$J_v = \sum_{t=1}^T g_v(t, u(t), v(t), x(t-1)) \rightarrow \max; \quad (2)$$

$$v(t) \in V(t), t = 1, 2, \dots, T; \quad (3)$$

$$J_u = \sum_{t=1}^T g_u(t, u(t), v(t), x(t-1)) \rightarrow \max; \quad (4)$$

$$u(t) \in U(t, v(t), x(t-1)), t = 1, 2, \dots, T; \quad (5)$$

$$\xi(t) \in \Xi(t), t = 1, 2, \dots, T; \quad (6)$$

$$x(t+1) = x(t) + f(t, x(t), u(t), \xi(t)); \quad (7)$$

$$x(0) = x_0, t = 0, 1, \dots, T-1, \quad (8)$$

где Ω – область, представляющая собой совокупность диапазонов значений основных показателей состояния экологической системы, в которых гарантируется ее нормальное развитие, область гомеостаза;

$x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$ – вектор состояния ИУЭС в момент времени t ;

$u(t) = (u_1(t), \dots, u_m(t))$ – вектор управляющих воздействий Ведомого (источник воздействия на экосистему) на ИУЭС в момент t ;

$v(t) = (v_1(t), \dots, v_p(t))$ – вектор управляющих воздействий Ведущего (тот или иной природоохранный орган) на Ведомого в момент t ;

$\xi(t) = (\xi_1(t), \dots, \xi_r(t))$ – вектор неконтролируемых внешних воздействий на ИУЭС в момент t ;

Ξ – область возможных значений внешних факторов в момент t ;

$V(t)$ – область допустимых управлений Ведущего в момент t , положительное приращение $v(t)$ – поощрение (премия, льгота и т.д.), отрицательное – наказание (штраф) ;

$U(t, v(t), x(t-1))$ – область допустимых управлений Ведомого в момент t , воздействие $u(t)$ – количество потребляемых в году t природных ресурсов или величина загрязнения окружающей среды в году t ;

$g_v(t, u(t), v(t), x(t-1)), g_u(t, u(t), v(t), x(t-1))$ – целевые функции Ведущего и Ведомого в момент t ;

J_v, J_u – общие целевые функции Ведущего и Ведомого за период $[0, T]$, где T – период прогнозирования;

$f(t, x(t), u(t), \xi(t))$ – оператор перехода системы из состояния в момент t в состояние в момент $t+1$;

$x_0 = (x_{01}, \dots, x_{0n})$ – известное начальное состояние системы [4].

Используя различные инструменты управления устойчивым развитием, в том числе методы решения в динамике, например, принцип максимума Понтрягина, уравнения Гамильтона–Якоби–Беллмана, численные методы, имитационное моделирование и др., можно также решить важнейшие прикладные задачи, такие как: борьба с загрязнением мелководных экосистем и оптимальное рыболовство, устойчивое развитие университетов, согласование интересов в региональном управлении, продвижение инноваций, борьба с коррупцией в системах управления и др.

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод, что для долгосрочного, успешного и стабильного развития нашей страны, одним из важнейших условий которого является сохранение экологического равновесия, крайне важно все больше внимания уделять совершенствованию законодательной базы в сфере природопользования, а также практическому внедрению передовых механизмов и технологий, позволяющих гармонично развивать производство и экономику в соответствии с принципами концепции устойчивого развития. Ввиду чего представляется целесообразным максимально возможное привлечение членов научного сообщества, которые готовы предоставить свои разработки в области УР и помочь внедрить их на конкретных предприятиях или при реализации различных проектов.

Список использованных источников

1. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года // принята 25 сентября 2015 г. резолюцией A/70/L.1 Генеральной Ассамблеи ООН // офиц. текст [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1_ru
2. Хмелева, Е. Устойчивое развитие в России. Правовые аспекты: состояние правового поля и правовой практики / Е. Хмелева // Деловой журнал в области КСО и Устойчивого развития «Sustainable business» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://csrjournal.com/7511-ustoychivoe-razvitie-v-rossii-pravovye-aspekty-sostoyanie-pravovogo-polya-i-pravovoy-praktiki.html>
3. «Горячие» документы – Окружающая природная среда и природные ресурсы // Информационно-правовой портал КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/t11/>
4. Угольницкий, Г. А. Управление устойчивым развитием активных систем : монография / Г. А. Угольницкий. – Ростов н/Д : Изд-во Южного федерального университета, 2016.
5. Половинкина, А. И. Начинаящим менеджерам: курс лекций : в 2-х ч. // А. И. Половинкина, И. С. Половинкин, Н. Ю. Калинина ; под ред. С. А. Баркалова ; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Ч. 2. – Воронеж : Изд-во ВГТУ. – 2018.

И. Е. Михеев

(Ижевский государственный технический университет
им. М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия)

ЗАДАЧА О ДИВЕРСИФИКАЦИИ РУБЛЯ ПО ДВУМ ВКЛАДАМ В КООПЕРАТИВНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Аннотация. Рассматривается задача распределения некоторой суммы в рублях на рублевой и другой валютный депозит с целью получения максимального дохода в рублях в конце срока хранения. Предполагается, что лица, принимающие решения, не знают курса другой валюты в конце срока хранения и ориентируются только на заданные границы возможных изменений. Решение данной задачи зависит от выбора принципа оптимальности. Задача рассматривается в кооперативной постановке. В качестве первичного принципа оптимальности используется принцип гарантированного результата.

I. E. Mikheev

(Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia)

THE TASK OF DIVERSIFICATION OF THE RUBLE BY TWO DEPOSITS IN THE COOPERATIVE SETTING

Abstract. The problem of allocating a certain amount of rubles to a ruble deposit and other foreign currency deposit is considered in order to obtain the maximum income in rubles at the end of the storage period. It is assumed that the persons making the decisions does not know the exchange rates at the end of the storage period and are guided only by certain limits of it is possible change. The solution of this problem depends on the choice of the principle of optimality. The problem is considered in the cooperative formulation. As the primary principle of optimality in this problem is used the principle of guaranteed result.

Введение. Принятие решений – вид человеческой деятельности, направленный на выбор способа достижения поставленной цели. При этом, довольно часто решение необходимо принимать в условиях неопределенности, т.е. при недостатке информации.

В работе [1, с. 117] рассмотрена задача о распределении единичного вклада в рублях по двум депозитам (рублевому и валютному) с целью получения в конце срока хранения максимальной суммы в рублях. Особенностью данной задачи является наличие неопределенности – отсутствие информации о курсе валюты в конце срока хранения. В качестве принципов оптимальности рассматривались принцип гарантированного по исходам решения и критерий Сэвиджа. Работы [2, 3] посвящены решению задачи о диверсификации рубля по трем вкладам. В работе [4] рассматривается задача о диверсификации рубля по рублевому и заданному числу валютных вкладов.

В настоящей работе рассматривается задача о диверсификации средств нескольких лиц по двум вкладам. Задача рассматривается в кооперативной постановке. В качестве первичного принципа оптимальности используется принцип гарантированного результата.

Постановка задачи. Имеется n участников (игроков), каждый из них считается лицом, принимающим решение (ЛПР), имея некоторое количество свободных средств в первой валюте, которые хотят распределить их по двум вкладам так, чтобы в конце срока хранения общая сумма полученных средств в первой валюте была наибольшей. Предполагается, что участники не знают курса второй валюты в конце срока хранения. Кроме того, будем предполагать, что если часть участников объединятся, то при вложении в какую-либо валюту средств, превосходящих определенную сумму A от общей суммы всех ЛПР, процентная ставка увеличивается. Требуется формализовать данный конфликт в виде кооперативной игры и найти решение в данной игре. В качестве принципов оптимальности будем использовать S -ядро и вектор Шепли.

Введем следующие обозначения:

$I = \{1, 2, 3 \dots n\}$ – совокупность участников; $SC I$ – коалиция, подмножество участников; x – сумма средств, предложенных к вложению во вторую валюту; r – коэффициент увеличения вклада по первой валюте; p – коэффициент увеличения вклада по второй валюте; K – курс валюты в начале срока хранения, K_1 – курс валюты в конце срока хранения, C_i – количество средств у i -го игрока,

$C_s = \sum_{i=1}^s C_i$ – сумма средств у коалиции S ; p_1 – новый коэффициент увеличения вклада по второй валюте; r_1 – новый коэффициент увеличения вклада по первой валюте. Будем предполагать, что $A < C_i < 2A$.

Рассмотрим коалицию S .

Если $C_s \leq A$, то в конце срока хранения коалиция S будет иметь сумму, равную

$$H(S, x, K_1) = (C_s - x)r + \frac{K_1}{K} px .$$

Если $C_s > A$, то в конце срока хранения коалиция S будет иметь сумму, равную

$$H(S, x, K_1) = \begin{cases} (C_s - x)r + \frac{K_1}{K} p_1 x, & \text{при } C_s \geq x > A, \\ (C_s - x)r_1 + \frac{K_1}{K} px, & \text{при } C_s - A > x \geq 0, \\ (C_s - x)r + \frac{K_1}{K} px, & \text{при } A \geq x \geq C_s - A. \end{cases}$$

Каждая коалиция S стремится выбрать x , при котором итоговая сумма $H(S, x, K_1)$ будет наибольшей. Будем предполагать, что участники знают пределы изменения K_1 в конце срока хранения. Обозначим $u = \frac{K_1}{K} p, u_1 = \frac{K_1}{K} p_1$. Считаем, что $u \in [a, b], u_1 \in [a_1, b_1]$ и при этом выполняются следующие неравенства

$$r_1 > r, \quad a < a_1 < b < b_1.$$

Построение характеристической функции. Определим функцию V следующим образом[^]

$V(S) = \max_x \min_{u, u_1} H(S, x, u, u_1)$. Используя свойства линейной функции получаем

Если $C_s \leq A$, то $V(S) = \max\{(C_s - x)r + xa\} = \max\{C_s r + x(a - r)\} = \max\{C_s r, C_s a\} = C_s \max\{a, r\}$.

Пусть $C_s > A$. Тогда

$$\min_{u, u_1} H(s, x, u, u_1) = \begin{cases} (C_s - x)r + a_1 x, & \text{при } x > A, \\ (C_s - x)r_1 + ax, & \text{при } x < C_s - A, \\ (C_s - x)r + ax, & \text{при } C_s - A \leq x \leq A. \end{cases}$$

Поэтому

$$\begin{aligned} \max_x \min_{u, u_1} H(s, x, u, u_1) &= \\ &= \max\{(C_s - A)r + a_1 A, a_1 C_s, C_s r_1, Ar_1 + a(C_s - A), Ar \\ &+ (C_s - A)a, C_s a, C_s r\} \\ &= \max\{(C_s - A)r + a_1 A, a_1 C_s, r_1 C_s, Ar_1 + a(C_s - A)\}. \end{aligned}$$

Теорема 1. V – характеристическая функция.

Доказательство. Для доказательства теоремы достаточно доказать, что $\forall S, T \subset I, S \cap T = \emptyset$ справедливо неравенство

$$V(S \cup T) \geq V(S) + V(T).$$

1. Пусть $C_s + C_T \leq A$. Тогда

$$\begin{aligned} V(S \cup T) &= \max\{r C_{S \cup T}, a C_{S \cup T}\} = \max\{(C_s + C_T)r, (C_s + C_T)a\} = \\ &= (C_s + C_T) * \max\{a, r\} = V(S) + V(T). \end{aligned}$$

2. Пусть $C_s \leq A, C_T \leq A, C_s + C_T > A$. Тогда

$$\begin{aligned} V(S \cup T) &= \max\{(C_s + C_T - A)r + a_1 A, a_1 (C_s + C_T), (C_s + C_T)r_1, Ar_1 + a(C_s + C_T \\ &- A)\} \geq \max\{a_1 (C_s + C_T), (C_s + C_T)r_1\} = (C_s + C_T) \max\{a_1, r_1\} \\ &\geq (C_s + C_T) \max\{a, r\} = V(S) + V(T). \end{aligned}$$

2. Пусть $C_s > A, C_T \leq A$, тогда $C_s + C_T > A$. Поэтому

$$\begin{aligned} V(S \cup T) &= \max\{(C_s + C_T - A)r + Aa_1, (C_s + C_T)a_1, (C_s + C_T)r_1, Ar_1 \\ &+ a(C_s + C_T - A), C_s r_1 + C_T a, C_s a_1 + C_T r\} \geq \\ &\geq \max\{C_s r_1 + C_T r, C_s r_1 + C_T a, C_s a_1 + C_T a, C_s a_1 + C_T r, Ar_1 \\ &+ (C_s - A + C_T)a, (C_s - A + C_T)r + Aa_1\} \geq V(S) + V(T). \end{aligned}$$

Теорема 2. Пусть $a < a_1 < r < r_1$. Тогда

$$V(S) = \begin{cases} C_S r, & \text{если } C_S \leq A, \\ C_S r_1, & \text{если } C_S > A. \end{cases}$$

Доказательство.

Пусть $C_S \leq A$. Из определения $V(S)$ имеем $V(S) = C_S \max\{a, r\}$. Так как $a < r$, то $V(S) = C_S r$.

Пусть $C_S > A$. Тогда $a_1 C_S \leq r_1 C_S$,

$$(C_S - A)r + a_1 A \leq (C_S - A)r_1 + r_1 A = C_S r_1,$$

$$Ar_1 + a(C_S - A) \leq Ar_1 + r_1(C_S - A) = C_S r_1.$$

Получаем $V(S) = C_S r_1$.

Теорема 3. Пусть $r < r_1 < a < a_1$. Тогда

$$V(S) = \begin{cases} C_S a, & \text{если } C_S \leq A, \\ C_S a_1, & \text{если } C_S > A. \end{cases}$$

C-ядро. Из [5] следует, что дележ $x = (x_1, \dots, x_n)$ принадлежит C-ядру, тогда и только тогда, когда для любой коалиции S справедливо неравенство

$$\sum_{i \in S} x_i \geq V(S). \quad (1)$$

Теорема 4. Пусть $a < a_1 < r < r_1$. Тогда C-ядро не пусто.

Доказательство. Рассмотрим вектор $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ такой, что $x_i^* = C_i r_1$ для всех $i \in I$. Из теоремы 2 следует, что x^* удовлетворяет (1).

Теорема 5. Пусть $r < r_1 < a < a_1$. Тогда C-ядро не пусто.

Вектор Шепли. Вектором Шепли называют вектор $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$ такой, что

$$\gamma_i = \sum_{S|i \in S} \frac{(|S|-1)!(n-|S|)!}{n!} (V(S) - V(S - \{i\})).$$

Обозначим

$N_S = \frac{(|S|-1)!(n-|S|)!}{n!}$, $V_{S_i} = V(S) - V(S - \{i\})$, S_1 — совокупность всех коалиций S , таких что $C_S \leq A$, S_2 — совокупность всех коалиций S , таких что $C_S > A$, $C_{S-\{i\}} \leq A$, S_3 — совокупность всех коалиций S , таких что $C_{S-\{i\}} > A$.

Тогда

$$\gamma_i = \sum_{\substack{S \in S_1 \\ i \in S}} N_S V_{S_i} + \sum_{\substack{S \in S_2 \\ i \in S}} N_S V_{S_i} + \sum_{\substack{S \in S_3 \\ i \in S}} N_S V_{S_i}.$$

Если $S \in S_1$, то $V_{S_i} = C_S \max\{r, a\}$.

Если $S \in S_2$, то $V_{S_i} = \max\{(C_S - A)r + Aa_1, C_S a_1, C_S r_1, Ar_1 + a(C_S - A)\} - C_{S-\{i\}} \max\{r, a\}$.

Если $S \in S_3$, то

$$V_{S_i} = \max\{(C_S - A)r + Aa_1, C_S a_1, C_S r_1, Ar_1 + a(C_S - A)\} - \max\{(C_{S-\{i\}} - A)r + Aa_1, C_{S-\{i\}} a_1, C_{S-\{i\}} r_1, Ar_1 + a(C_{S-\{i\}} - A)\}.$$

Список использованных источников

1. Жуковский, В. И. Уравновешивание конфликтов и приложения / В. И. Жуковский, К. Н. Кудрявцев. – М. : Ленанд, 2012. – 304 с.
2. Жуковский, В. И. Гарантированное по риску решение в задаче о диверсификации вклада по трем депозитам (рублевому, в долларах и евро) / В. И. Жуковский, П. К. Ахрамеев // Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Серия «Физ-мат науки». – 2014. – Т. 27(66), № 1. – С. 177 – 197.
3. Жуковский, В. И. К задаче диверсификации вклада по трем депозитам / В. И. Жуковский, Н. Г. Солдатова // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2013. – № 4. – С. 55 – 61.
4. Петров, Н. Н. К задаче о диверсификации рубля / Н. Н. Петров, Н. В. Петрова // Известия Института математики и информатики УдГУ. – 2018. – Т. 51. – С. 123 – 135.
5. Петросян, Л. А. Теория игры / Л. А. Петросян, Н. А. Зенкович, Е. В. Шевкопляс. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.

Д. Н. Федянин

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

МОДЕЛЬ СОЦИАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ УМНЫХ ДАТЧИКОВ

Аннотация. Исследованы свойства динамики мнений эвристических почти байесовых агентов в сетях репутаций. Приведены результаты численных экспериментов, показаны случаи, когда значимость мнения агента с высокой точностью пропорциональна произведению количеству соседей агента и его репутации, под которой в данном случае понимается совокупная характеристика количества и точности измерений, произведенных этим агентом.

D. N. Fedyanin

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia)

MODEL OF SOCIAL TRAINING OF SMART SENSORS

Abstract. The paper studies the properties of the dynamics of opinions of heuristics of almost Bayesian agents in reputation networks. The results of numerical experiments are presented, cases are shown where the significance of the agent's opinion is highly accurate proportional to the product of the number of neighbors of the agent and its reputation, which in this case is understood as the combined characteristic of the quantity and accuracy of measurements made by this agent.

Введение. Рассмотрим сеть, состоящую из нескольких устройств и связей между ними. Устройства могут до начала обмена данными измерить несколько раз параметр с некоторым шумом, синхронно обмениваться данными со связанными с ним устройствами и производить вычисления. Задача устройств – иметь наилучшую из возможных оценок.

Наша задача, как исследователей, выяснить, как будут связаны конечные оценки, полученные этими устройствами со структурой сети и количеством. Так же нашей задачей будет попытаться восстановить значение параметра по конечным оценкам параметра. В работе мы будем использовать термины агенты и устройства как синонимы, рассматривая устройства как агентов специальных типов.

Эту область исследования называют социальным обучением (Social Learning), иногда байесовым обучением, справедливо считая, что такие устройства могут быть названы байесовыми агентами. Отметим, что эта область исследований, строго говоря, не является исследованием байесовых игр, хотя, несомненно, устройства в нашей задаче имеют целевые функции и, в принципе, могут быть снабжены стратегиями, влияющими на результат, например, выбором оптимального количества начальных измерений или связей с другими агентами (если мы не фиксируем начальную сеть жестко, а позволяем агентам соединяться в другими агентами. В последнем случае нетривиальной является задача о координации присоединения агентов друг к другу, если количество их изменений одинаково – задача содержит в себе сложную задачу о протоколе распространения слухов, известной под названием Gossipprotocols. Она состоит в том, чтобы агенты выбрали наилучшую стратегию обмена уникальной информацией в условиях неопределенности и центрального управления. В случае центрального управления известно, что n агентам требуется не менее $2n - 4$ соединений между собой для того, чтобы вся известная информация стала общим знанием.

Несложно показать, что если агентам разрешено получать информацию от своих друзей только один раз, то при нормальном распределении ошибки измерения, агентам следует изменить свою оценку на линейную комбинацию, своей оценки и полученных от других агентов оценок, с учетом дисперсий и количества измерений, произведенных каждым устройством. Для простоты мы отдельно рассмотрим случай, когда дисперсии измерений агентов одинаковы. В случае, если цель агентов – получить оценку, максимально близкую к среднему значению всех измерений, а не к математическому ожиданию, то вид функции распределения случайного шума уже не имеет значения.

Отметим, что мы можем, как исследователи, сразу вычислить оптимальную оценку, если мы знаем все измерения агентов, или даже все начальные оценки и количество произведенных измерений. Для этого нам надо представить себе, что граф связей между агентами – полный – в этом случае их оценки

будут совпадать между собой и максимально точной оценкой, и будут линейной комбинацией начальных оценок устройств-агентов.

Альтернативы поведения. Когда устройств получает информацию о том, что один из его друзей изменил свою оценку – может быть несколько вариантов дальнейших действий, причем кажется ясным, что новая оценка должна быть точнее, чем первоначальная, в силу того, что агент байесовский.

Первый вариант действий – несмотря на то, что новая оценка стала лучше не менять свою оценку, так как непонятно, что стало причиной этих изменений. Тем не менее, такой вариант кажется контринтуитивным. Пусть изменилась оценка только одного друга, тогда ясно, что, сдвинув свою оценку в сторону этой новой оценки на очень малое значение, можно улучшить свою оценку – вопрос в том, как много значения можно придавать этой оценке. Это приводит ко второму варианту действий.

Второй вариант – фиксировать доверие к оценке каждого из друзей и в предположении о независимости их источников в дальнейшем просто пересчитывать свою оценку с заранее фиксированными на первом шаге коэффициентами. Очевидно, у этого варианта также есть недостатки.

Третий вариант – фиксировать для каждого агента некоторый вспомогательный параметр, который бы показывал, как учитывать изменение оценки друга, если только один друг изменил свое мнение. В общем случае можно иметь матрицу оценки. При этом, как выбирать коэффициенты в третьем варианте, не очень понятно. Более того, не очень понятно, какую из трех стратегий следует признать наиболее близкой к байесовой или даже, более рациональной.

Пусть теперь граф известен, причем известно и сколько измерений какой агент сделал. Это существенно облегчает нашу задачу. Действительно, теперь мы можем вычислить, с каким весом учитывать новые оценки агентов. Можно показать, что в этом случае, если граф – сильно связный, а именно – если существует путь из любой вершины к любой другой, то, имея эту информацию, оценки стабилизируются за количество шагов, не превышающее диаметра графа, причем оценки будут максимально точными. Рассмотрим промежуточный вариант – когда сам граф не известен, однако агенты, помимо своей оценки, указывают также в начальный момент количество своих измерений, назовем такой параметр – надежность, и в дальнейшем они указывают только данные, т.е. два числа. В этом случае возникает известный эффект, вызывающий искажения. Эти искажения связаны с тем, что два соседних с агентом агента могут получать информацию от одного и того же агента.

Мы построили численную модель для изучения второго случая, сгенерировали сети по известным алгоритмам: Эрдоша–Реньи, Барабаши–Альберта, Ватса–Строгатца и несколько реальных сетей. Было обнаружена закономерность, что зависимость итоговой оценки от начальных оценок агентов зависит не толь-

ко от количества проведенных ими измерений, а и от количества их друзей, причем есть корреляция между обычным произведением этих двух факторов.

Результаты. Результаты моделирования приведены на рис 1 – 3. Были сгенерированы сети заданных параметров и проведено моделирование динамики.

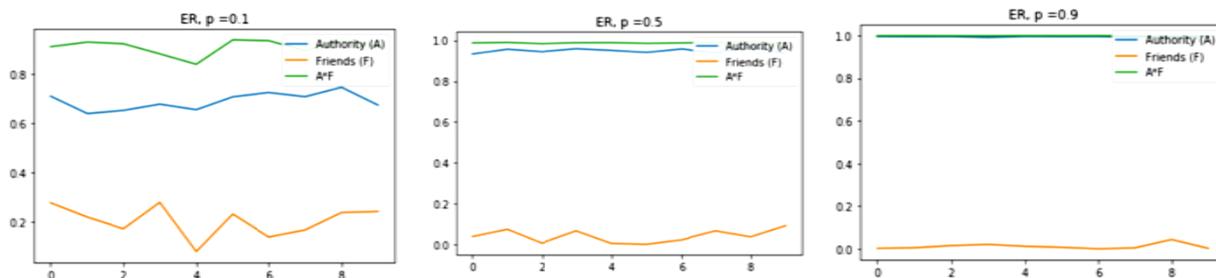


Рис. 1. На каждом графике 10 сетей Эрдоша–Реньи по 100 узлов каждая. По вертикали отложен R^2 для линейной корреляции между репутацией и влиятельностью в сети, по горизонтали – номер эксперимента

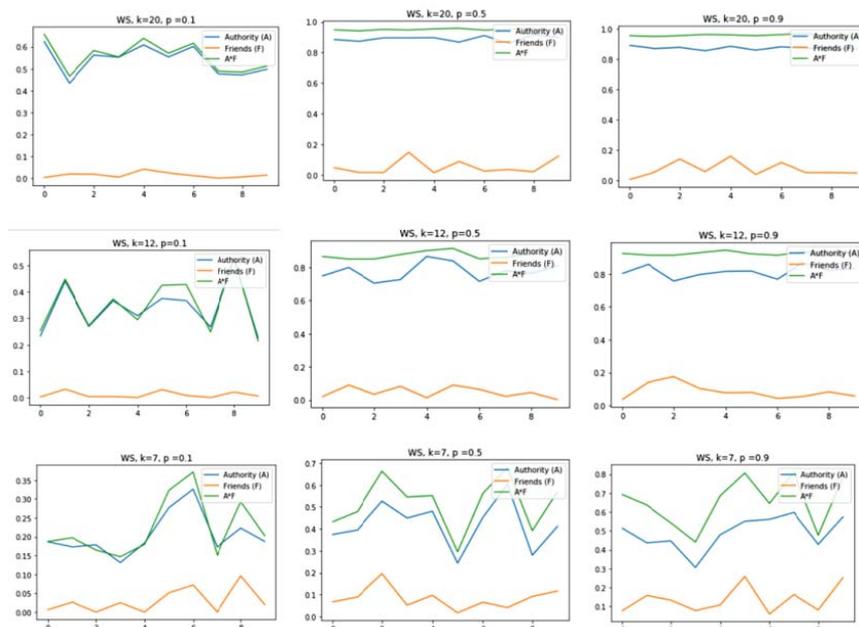


Рис. 2. На каждом графике 10 сетей Ватса–Строгатца по 100 узлов каждая. По вертикали отложен R^2 для линейной корреляции между репутацией и влиятельностью в сети, по горизонтали – номер эксперимента

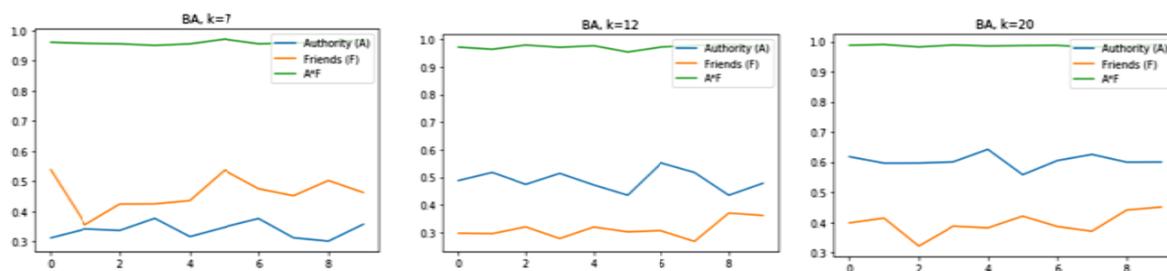


Рис. 3. На каждом графике 10 сетей Барабаши–Алтберта по 100 узлов каждая. По вертикали отложен R^2 для линейной корреляции между репутацией и влиятельностью в сети, по горизонтали – номер эксперимента

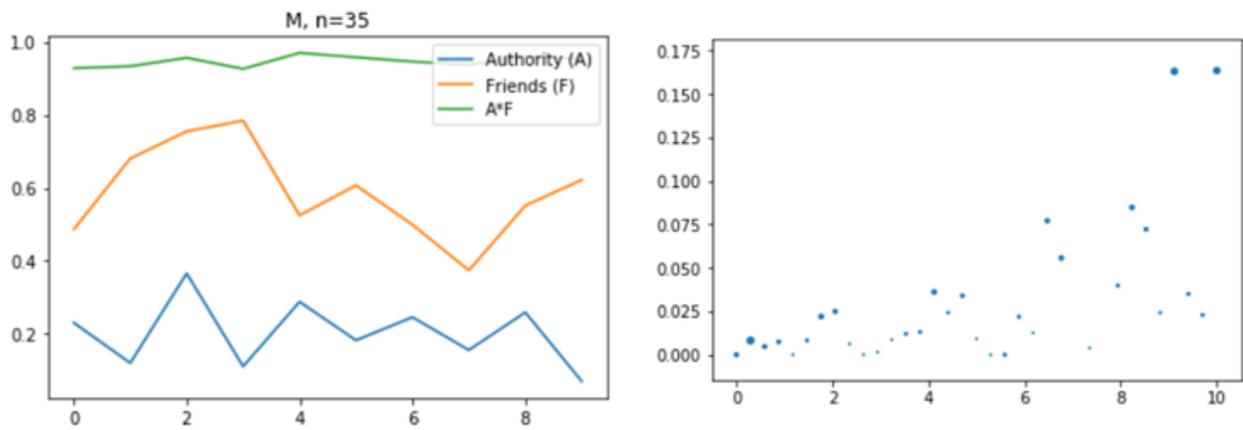


Рис. 4. На левом графике динамика на реальной сети 35 банд Монреал.

По вертикали отложен R^2 для линейной корреляции между репутацией и влиятельностью в сети, по горизонтали – номер эксперимента. На правом графике каждая точка – данные об агенте, горизонтальная – его авторитетность, вертикальная – его влиятельность, размер точки многократно зависит от количества друзей (растет)

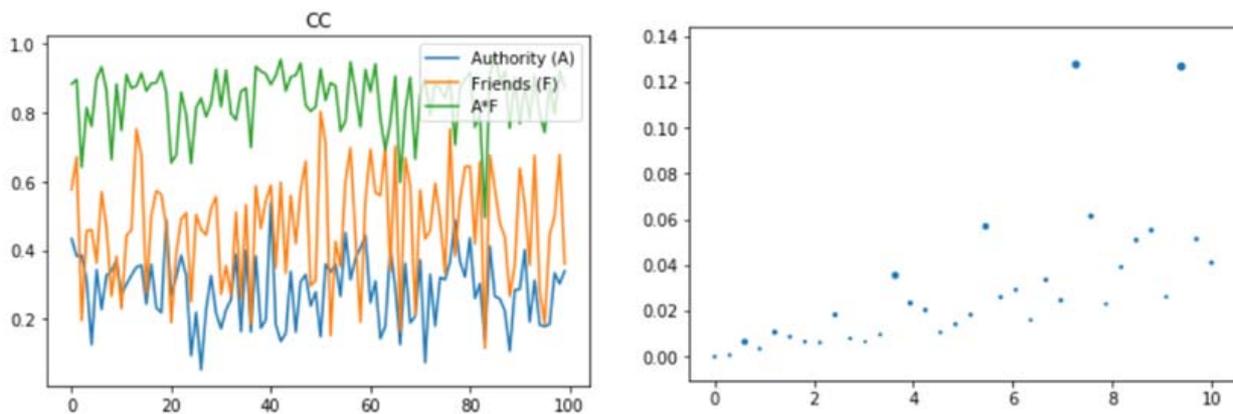


Рис. 5. На левом графике динамика на реальной сети клуба Каратэ.

По вертикали отложен R^2 для линейной корреляции между репутацией и влиятельностью в сети, по горизонтали – номер эксперимента. На правом графике каждая точка – данные об агенте, горизонтальная – его авторитетность, вертикальная – его влиятельность, размер точки многократно зависит от количества друзей (растет)

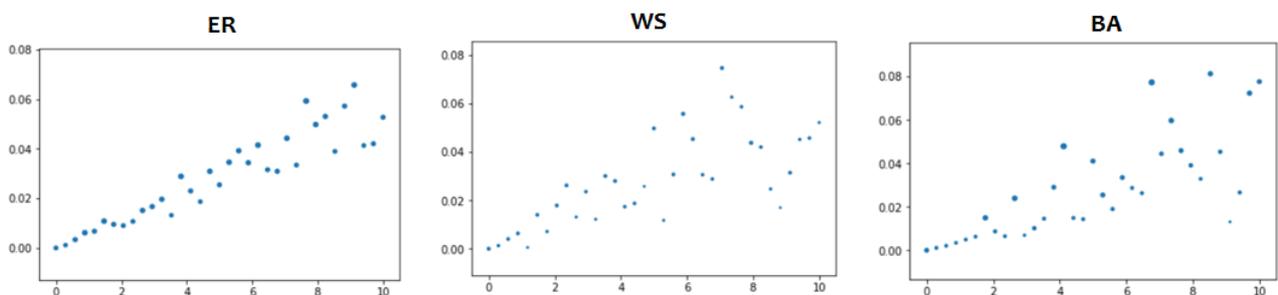


Рис. 6. На графиках каждая точка – данные об агенте, горизонтальная – его авторитетность, вертикальная – его влиятельность, размер точки многократно зависит от количества друзей (растет). График слева – модель Эрдоша–Реньи, средний график – Ватса–Строгатца, справа – Барабаши–Альберт

Выводы. Исследования показали, что характерной особенностью является большая линейная корреляция влиятельности агентов не только от авторитетности или от количества друзей, но от произведения этих факторов. Само наличие такой связи интуитивно понятно (но подтверждение этого тоже было полезно), но и оказалось, что корреляция даже линейная.

Дальнейшие исследования могут быть посвящены управлению этим эффектом, а также изучение случая неравномерного распределения начальной авторитетности.

Список использованных источников

1. Flache, Andreas, Mäs, Michael, Feliciani, Thomas, Chattoe-Brown, Edmund, Deffuant, Guillaume, Huet, Sylvie and Lorenz, Jan (2017) 'Models of Social Influence: Towards the Next Frontiers' *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 20 (4) 2 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/20/4/2.html>>. doi: 10.18564/jasss.3521
2. Chkhartishvili A. & Kozitsin I. (2018, October). "Binary Separation Index for Echo Chamber Effect Measuring". In 2018 Eleventh International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD (pp. 1 – 4). IEEE.
3. Kozitsin I. V. & Belolipetskii, A. A. (2019). Opinion convergence in the Krasnoshchekov model. *The Journal of Mathematical Sociology*, 43(2), 104 – 121.
4. Kozitsin I. V. (2018). Generalization of Krasnoshchekov's model for the case of a decomposable matrix of social interactions. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 10(4), 398 – 406.
5. Belolipetskii A. A. & Kozitsin, I. V. (2017). Dynamic variant of mathematical model of collective behavior. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 56(3), 385 – 396
6. Agaev R. P. and Chebotarev P. Yu. Convergence and Stability in Characteristic Coordination Problems, *Upravlen. Bol'sh. Sist.*, 2010, v. 30, no. 1, pp. 470 – 505.
7. Agaev R. P. and Chebotarev P. Yu. The Projection Method for Reaching Consensus and the Regularized Power Limit of a Stochastic Matrix, *Autom. Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 12, pp. 2458 – 2476.
8. Gubanov D. A., Novikov D. A. and Chkhartishvili A. G. *Sotsial'nyeseti: modeli inforatsionnogo vliyaniya, upravleniya i protivoborstva* (Social Networks: Models of Informational Influence, Control and Contagion), M.: Fizmatlit, 2010.
9. Zuev A. S. and Fedyanin D. N. Models of Opinion Control for Agents in Social Networks, *Autom. Remote Control*, 2012, vol. 73, no. 10, pp. 1753 – 1764. *AUTOMATION AND REMOTE CONTROL* Vol. 79. No. 6 2018
10. Fedyanin D. N. and Chkhartishvili A. G. A Model of Informational Control in Active Network Structures in Case of an Incomplete Awareness of the Principal, *Autom. Remote Control*, 2013, vol. 74, no. 12, pp. 2155 – 2162.

11. Shiryaev A. N. Veroyatnost'. Moscow: Mosk. TsentrNepriyv. Mat. Obrazovan., 2004. vols. 1, 2.

12. Berger R. L. A Necessary and Sufficient Condition for Reaching a Consensus Using DeGroot's Method, J. Am. Statist. Assoc., 1981, vol. 76, pp. 415 – 418.

13. DeGroot M. H. Reaching a Consensus, J. Am. Statist. Assoc., 1974, no. 69, pp. 118 – 121.

14. Friedkin N. E. and Johnsen E. C. Social Influence Networks and Opinion Change, Adv. Group Proces., 1999, no. 16, pp. 1 – 29.

15. Golub B. and Jackson M. O. Naïve Learning in Social Networks and the Wisdom of Crowds, Am.

16. Econom. J.: Microeconomics, February, 2010, vol. 2, no. 1, pp. 112 – 149.

17. Hegselmann R. and Krause U. Opinion Dynamics and Bounded Confidence Models, Analysis, and Simulation, J. Artific. Soc. Soc. Simulat. (JASSS), 2002, vol. 5, no. 3, pp. 1 – 33.

18. Jackson M. Social and Economic Networks, Princeton: Princeton Univ. Press, 2008.

О. Н. Бекирова, М. С. Трифонова, Е. А. Рогозина
(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ЖИЛОЙ НЕДВИЖИМОСТИ

Аннотация. Представлен анализ качества жилищного строительства на примере внутреннего устройства многоэтажного крупнопанельного жилого дома со встроенными нежилыми помещениями и объектами инженерной инфраструктуры путем квалиметрической оценки основных показателей качества с применением метода Делфи.

O. N. Bekirova, M. S. Trifonova, E. A. Rogozina
(Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia)

INFLUENCE OF THE QUALITY ASSESSMENT SYSTEM ON THE COMPETITIVENESS OF RESIDENTIAL REAL ESTATE OBJECTS

Abstract. The article presents an analysis of the quality of housing construction on the example of the internal structure of a multi-storey large-panel residential building with built-in non-residential premises and engineering infrastructure objects through a qualimetric assessment of the main quality indicators using the Delphi method.

Вопросам управления качеством уделяется в настоящее время повышенное внимание как со стороны бизнеса, заинтересованного в повышении конкурентоспособности предлагаемых товаров и услуг, так и со стороны различных потребителей выпускаемой продукции: общества и отдельных граждан.

Оценивание качества является одним из важнейших элементов в задачах управления качеством, поскольку динамика значений комплексной оценки, сопоставление этих оценок для конкурирующих между собой аналогов и т.п. – служит основой для выработки управляющих и корректирующих воздействий, направленных на постоянное повышение качества.

В данной статье рассматривается задача повышения конкурентоспособности объектов жилой недвижимости на основе квалиметрической оценки качества.

Квалиметрическая оценка представляет собой совокупность методов измерения количественной оценки качества различных объектов, использующиеся для принятия обоснованных решений в процессе управления качеством продукта.

Уровень качества продукции представляет собой относительную характеристику качества продукции, которая основана на сравнении абсолютных показателей ее качества с базовыми показателями. Целью метода квалиметрической оценки качества строительного проекта являются разработка и совершенствование методов и способов, с помощью которых качество оцениваемого строительного объекта может быть численно выражено, и это позволит выявить как степень удовлетворения исследуемым объектом общественным потребностям, так и уровень соответствия возводимого объекта строительным нормам и требованиям [3].

В качестве базовых значений показателей качества продукции следует выбрать показатели, соответствующие требованиям нормативных документов (стандартов, требований технических условий (ТУ)).

Пусть P_i – абсолютное значение показателя качества, K_i – относительное значение качества.

Оценка K_i является функцией следующих двух абсолютных показателей:

$$K_i = f(P_i, P_i^{\text{баз}}), \quad (1)$$

где P_i – абсолютное значение измеряемого показателя; $P_i^{\text{баз}}$ – абсолютное значение базового показателя.

K_i рассчитывается как отношение данных показателей:

$$K_i = \varphi\left(\frac{P_i}{P_i^{\text{баз}}}\right). \quad (2)$$

В качестве предмета анализа возьмем внутреннее устройство многоэтажного крупнопанельного жилого дома со встроенными нежилыми помещениями и объектами инженерной инфраструктуры. Фрагмент основных показателей качества данного строительного объекта представлен в табл. 1.

1. Фрагмент количественных и качественных показателей качества проекта

№ п/п	Наименование показателя	Значение		
		абсолютное	базовое	относительное
		P_i	$P_i^{\text{баз}}$	K_i
Количественные показатели качества проекта				
1	Этажность здания	18	18	1
2	Количество жилых этажей	17	17	1
3	Количество этажей	19	19	1
4	Строительный объем подземной части здания, м ³	5034	5034	1
5	Строительный объем надземной части здания, м ³	94 497	94 497	1
6	Площадь жилого здания, м ²	31 371	31 371	1
Качественные показатели качества проекта				
33	Наличие канализации	1	1	1
34	Наличие системы водоотведения	1	1	1
35	Наличие пункта круглосуточной охраны	2	1	2
36	Наличие системы видеонаблюдения	1	1	1
37	Наличие домофонов	1	1	1
38	Наличие системы оповещения людей о пожаре	1	1	1

Для того чтобы найти весомости отдельных свойств рассматриваемого объекта, применим такой метод опроса экспертов, как метод Делфи. Цель использования метода Делфи заключается в выявлении преобладающего мнения экспертов по поводу какого-либо вопроса.

Далее представлен фрагмент определения коэффициентов весомости экспертным методом, с помощью использования метода Делфи (табл. 2).

2. Результаты опроса экспертов

Номер показателя	Номера экспертов					Сумма рангов
	1	2	3	4	5	
Экологическая и общественная безопасность						
35	5	4	5	5	4	23
36	4	5	5	4	5	23
Функциональная комфортность						
22	4	4	4	3	4	19
24	4	3	3	4	4	18
Ресурсообеспечение						
13	4	5	5	5	5	24
34	5	5	5	5	5	25
Внутреннее устройство						
1	3	3	3	2	3	14
2	3	3	3	3	3	15
Эстетические свойства						
41	5	5	5	5	5	25
42	4	5	4	5	5	23

Затем находится отклонение от средней суммы рангов по формуле

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} - T_p. \quad (3)$$

Сумму квадратов отклонений находим по формуле

$$S^1 = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2, \quad (4)$$

$$S^1 = 0,5^2 + 0,5^2 + 1,5^2 + 1,5^2 + 1,5^2 + \dots + 1^2 + 4^2 = 12\,079,5.$$

Расхождение мнений экспертов было определено путем расчета коэффициента Конкордации [1] и получило значение $W_N = 0,761$. Так как $W_5 \geq 0,75$, работа экспертов считается достаточно согласованной и отсутствует необходимость в проведении следующих этапов опроса.

С целью обработки результатов экспертного опроса вычислим среднее арифметическое значение ненормированного коэффициента весомости

$$\bar{q}'_i = \sum_{y=1}^N \bar{q}'_{ij} / N, \quad (5)$$

где \bar{q}'_{ij} – ненормированный коэффициент весомости для i -го, j -го эксперта; N – число экспертов.

Проведем нормирование значений q_i и определим значения весомости для каждого свойства в группе и представим фрагмент расчета в табл. 3 [2].

3. Среднее арифметическое значение ненормированного коэффициента весомости

Показатель	\bar{q}'_{ij}
Экологическая и общественная безопасность	
35	0,1
36	0,1
Эстетические свойства	
41	2
42	1,6
Функциональная комфортность	
22	-0,2
24	-0,4
Ресурсообеспечение	
13	-2,7
14	-3,1
Внутреннее устройство	
1	-5,7
2	-5,5
3	-5,3
4	-4,1
5	-3,9
6	-6,3
7	-4,7

Сумма средних составит:

$$A = 0,1 + 0,1 + 0,3 + 0,3 + \dots - 5,1 - 3,5 = -103,6.$$

Значения весомости для каждого свойства определяются по формуле

$$q_i = \frac{\overline{q_i}}{A}. \quad (6)$$

Затем определим комплексную оценку качества исследуемого объекта путем расчета средневзвешенных показателей.

Средняя арифметическая взвешенная вычисляется по формуле

$$K = \sum_{i=1}^n q_i k_i, \quad (7)$$

где K – комплексный показатель качества; k_i – единичный относительный показатель качества; q_i – коэффициент весомости.

$$K = -0,000965251 \times 1 + (-0,000965251 \times 1) + \dots + (-0,008218411 \times 1) = 1,045.$$

Средняя геометрическая взвешенная:

$$K = \prod_{i=1}^n K_i^{q_i}, \quad (8)$$

$$K = 1,00^{(0,000965251)} \times 1,00^{(-0,000965251)} \times \dots \times 1^{(-0,008218411)} = 1,089.$$

Средняя гармоническая взвешенная

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{K_i}}, \quad (9)$$

$$K = \frac{1}{1,2062726176} = 1,025.$$

В результате расчетов получили, что все средневзвешенные величины отвечают условию: $K \geq 1$, следовательно, рассматриваемый строительный объект является качественным и отвечает основным стандартам и требованиям качества, что способствует конкурентоспособности объекта.

Таким образом была проведена квалиметрическая оценка качества проекта по строительству объекта жилой недвижимости в мкр. Черемушки г. Воронежа. Оценка качества проекта была дана с использованием метода Делфи для определения весомостей отдельных свойств качества проекта. По результатам данной оценки, исследуемый проект является качественным продуктом и отвечает основным требованиям и стандартам качества.

Список использованных источников

1. Бекирова, О. Н. Алгоритм рыночной кластеризации жилищного строительства с точки зрения потребителей / О. Н. Бекирова, М. С. Трифонова // Научно-практический журнал «Экономика и менеджмент систем управления». – 2016. – 4.2 (22).

2. Бекирова, О. Н. Имитационное моделирование управления конкурентоспособностью строительных проектов / О. Н. Бекирова, М. С. Трифонов, А. В. Приходченко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 1, № 9. – С. 110 – 115.

3. Трифонова, М. С. Применение математического моделирования в управлении конкурентоспособностью строительных объектов / М. С. Трифонова // Управление инновационно-инвестиционной деятельностью предприятий и организаций. – 2017. – С. 100 – 102.

Т. А. Аверина, З. О. Брежнева

(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

МЕХАНИЗМ ОБРАТНЫХ ПРИОРИТЕТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ЗАДАЧ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Аннотация. Анализируется статистика инновационной активности в строительной сфере и делается предположение о недостаточной популяризации и систематизации лучших управленческих практик, приводится алгоритм решения ресурсной задачи по методам прямых и обратных приоритетов.

T. A. Averina, Z. O. Brezhneva

(Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia)

MECHANISM OF REVERSE PRIORITIES FOR SOLVING RESOURCE PROBLEMS IN CONSTRUCTION

Abstract. The article presents the statistics of innovation activity in the construction industry and makes an assumption about the lack of popularization and systematization of the best practices of management innovations, provides an algorithm for solving the resource problem using the methods of direct and inverse priorities.

Введение. В условиях современного развития строительного производства важно поддерживать рациональное и экономичное ведение дел. Задачи, возникающие в управлении строительством, как известно, специфичны и затрагивают большое число заинтересованных сторон, преследующих собственные ин-

требования. Тенденции к поиску возможностей приведения интересов к равновесию и подчинению целям компании обуславливают актуальность исследования.

Согласно статистическим данным [1], разработку и освоение инноваций сегодня осуществляют не более 10% российских предприятий, а уровень инновационной активности в строительной сфере составляет 1,1% (рис. 1).

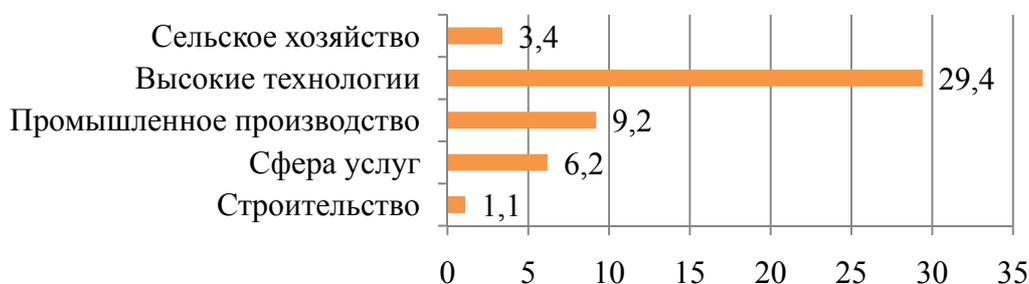


Рис. 1. Анализ инновационной активности по сферам экономики [1]

По данным 2016 г., структура затрат на инновационную деятельность в международном сопоставлении выглядела следующим образом (рис. 2).

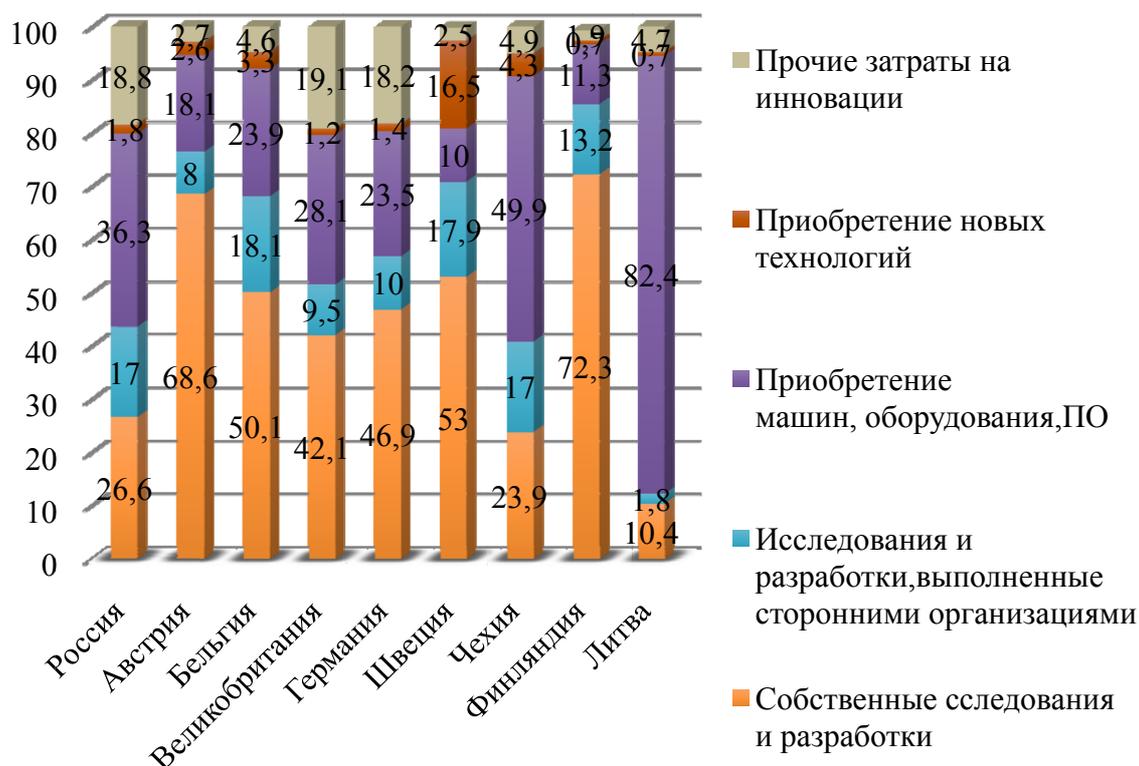


Рис. 2. Срез затрат на инновации, 2016 г. [1]

В рейтинге инноваций в строительстве управленческие занимают второе место, лишь 2,3% фирм реализуют данное направление (рис. 3).



Рис. 2. Удельный вес строительных организаций, осуществлявших инновации в общей выборке обследованных фирм, % [1]

Низкий рейтинг управленческих инноваций в строительной индустрии может быть обусловлен тем, что сегодня подобные практики мало систематизированы и популяризованы, целесообразно создание комплекса базовых инструментов, позволяющих решать управленческие задачи [4].

Большую работу в данном направлении в России осуществляет Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН.

Исследователи [2, 3] систематизировали лучшие практики и представили четыре группы инструментов, отвечающих базовым функциям менеджмента: планирование, организация, мотивация, контроль.

Прямой алгоритм решения ресурсной задачи. Рассмотрим принцип прямых приоритетов. Предположим, что ограниченный ресурс распределяется между цехами строительной фирмы. Распределяющий центр, вероятно, организует пропорциональное деление ресурса с поправкой на распределительный коэффициент [2]:

$$\mu = R/\sum S_i, \quad (1)$$

где R – ограничение на ресурс; S_i – заявка на ресурс.

Рассмотрим пример определения равновесных заявок. Пусть имеется шесть потребителей, заявки которых определяются числами: 8, 12, 5, 9, 11. Общее количество ресурса – 45. Значит, $\mu = 45/(7 + 8 + 12 + 5 + 9 + 11) = 45/52 = 0,86$.

1. Равновесные заявки s_i^*

s_1^*	$7 \cdot 0,86 = 6,02;$	s_4^*	$5 \cdot 0,86 = 4,30;$
s_2^*	$8 \cdot 0,86 = 6,88;$	s_5^*	$9 \cdot 0,86 = 7,74;$
s_3^*	$12 \cdot 0,86 = 10,32;$	s_6^*	$11 \cdot 0,86 = 9,46;$

Таким образом, получение равновесных заявок прямым способом позволяет распределить ресурс пропорционально заявленным требованиям и в соответствии с ресурсным ограничением. Девиз такого принципа распределения: «чем больше просишь, тем больше получишь».

Таблица наглядно иллюстрирует увеличение доли ресурса по мере роста потребности в нем. Использование «прямого» алгоритма не всегда экономически выгодно: запросы на ресурс растут и дают искаженное представление о реальных потребностях.

Далее перейдем к рассмотрению принципа обратных приоритетов.

«Обратный» алгоритм решения ресурсной задачи. Центр в рамках данного подхода исходит из утверждения: чем больше коэффициент потерь агента, тем менее эффективна и рациональна его деятельность.

Введем обозначения: если M_i обозначает максимальные потери (прибыль) i -го потребителя, то за коэффициент потерь (эффекта) μ разумно принять величину M_i / S_i , где S_i – заявка на ресурс.

Соответствующий закон распределения принимает вид [2]

$$x_i = \begin{cases} s, & \text{если } \sum s, \leq R, \\ R^* \frac{M_i/S_i}{\sum M_i/S_i}, & \text{если } \sum s, \leq R', \end{cases} \quad (2)$$

где R – количество ресурса в распоряжении центра; x_i – выделяемое количество ресурса по механизму обратных приоритетов.

Таким образом, принцип обратных приоритетов выглядит следующим образом[2]:

$$x_i = \min \left(x_i, R^* \frac{M_i/S_i}{\sum M_i/S_i} \right). \quad (3)$$

В условиях этого закона распределения равновесие в системе по Нэшу определится решением системы уравнений (4), (5) [2]:

$$s_i = R^* \frac{M_i/S_i}{\sum M_i/S_i}. \quad (4)$$

Решение системы [2]:

$$s_i^* = R^* \frac{\sqrt{M_i}}{\sum M_i}. \quad (5)$$

Рассмотрим предыдущий пример с использованием алгоритма обратных приоритетов. Вычислим коэффициент распределения ресурсов по формуле (5)

$$\sqrt{\mu} = 45/(\sqrt{7} + \sqrt{8} + \sqrt{12} + \sqrt{5} + \sqrt{9} + \sqrt{11}) = 45/17,49 = 2,57$$

Найдем по формуле (5) равновесные заявки для случая с обратными приоритетами (табл. 2) и сравним с результатами, полученными ранее (табл. 1).

2. Равновесные заявки s_i^*

Обратные приоритеты				Прямые приоритеты			
s_1^*	$\sqrt{7} \cdot 2,57 = 6,79;$	s_4^*	$\sqrt{5} \cdot 2,57 = 5,74;$	s_1^*	$7 \cdot 0,86 = 6,02;$	s_4^*	$5 \cdot 0,86 = 4,30;$
s_2^*	$\sqrt{8} \cdot 2,57 = 7,26;$	s_5^*	$\sqrt{9} \cdot 2,57 = 7,71;$	s_2^*	$8 \cdot 0,86 = 6,88;$	s_5^*	$9 \cdot 0,86 = 7,74;$
s_3^*	$\sqrt{12} \cdot 2,57 = 8,90;$	s_6^*	$\sqrt{11} \cdot 2,57 = 8,52;$	s_3^*	$12 \cdot 0,86 = 10,32;$	s_6^*	$11 \cdot 0,86 = 9,46;$

Таблица 2 иллюстрирует перераспределение ресурса в сторону наименьших заявок в «обратном» алгоритме. Так, центр поощряет рациональное использование ресурса и предотвращает неоправданное завышение заявок.

Заключение. В ходе анализа инновационной активности отечественных фирм выявлено, что имеет место тенденция к бенчмаркингу управленческих инноваций. Соответственно, для России характерна практика заимствования новшеств.

Решение ресурсной задачи приводит к следующим выводам: во-первых, применение прямого метода распределения допускает манипулирование информацией со стороны агентов, что снижает эффективность системы.

Во-вторых, минимизировать отрицательные эффекты позволяет «обратный» механизм, однако при его применении недопустимо ограничение в ресурсе агента, потребность которого завышена ввиду соблюдения им технологии производства. Важно расставлять приоритеты с учетом корреляции между особенностями деятельности и потребностью в ресурсе для соблюдения технологических нужд. Максимальный эффект механизм дает при делении ресурса между агентами, реализующими один и тот же вид деятельности.

Список использованных источников

1. Индикаторы инновационной деятельности: 2018 : статистический сборник / Н. В. Городникова, Л. М. Гохберг, К. А. Дитковский и др. ; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М. : НИУ ВШЭ, 2018. – 344 с.
2. Бурков, В. Н. Распределение водных ресурсов / В. Н. Бурков, И. В. Гуевский, Т. Б. Нанева // Автомат. и телемех. – 1980. – Вып. 1. – С. 81 – 90.
3. Новиков, Д. А. Механизмы управления : учебное пособие / Д. А. Новиков. – М. : УРСС (Editorial URSS), 2011. – 213 с.

4. Аверина, Т. А. О возможности применения «умных» механизмов при управлении стейкхолдерами строительного проекта [Электронный ресурс] / Т. А. Аверина, З. О. Брежнева // Научная опора воронежской области : сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. – Электрон. текстовые и граф. данные. – Воронеж : ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. – С. 122 – 125.

А. В. Зобненко

(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО СТЕЙКХОЛДЕРАМИ ПРОЕКТА

Аннотация. Подробно описываются основы теории управления стейкхолдерами, проводится разбор основных подходов к освоению данной области управления проектами и их взаимосвязь с остальными областями. Так же были определены основные задачи, стоящие перед менеджером в данной области управления.

A. V. Zobnenko

(Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia)

KEY TASKS OF INTERACTION WITH STAKEHOLDERS OF THE PROJECT

Abstract. This article describes in detail the basics of the theory of stakeholder management, analyzes the main approaches to the development of this area of project management and their relationship with other areas. The main tasks facing the manager in this area of management were also identified.

Во многом позиции компании на рынке или успех деятельности проекта зависит от выстраивания качественных отношений с потребителями, государственными органами, СМИ, сотрудниками, акционерами и т.д. С каждым годом качеству созданных коммуникаций с представленными выше группами лиц отдаются все более важные позиции. Качество коммуникаций воспринимается как одна из важных управленческих задач. Сегодня успешные проекты – это те, которые внедряют единую систему коммуникации со всеми стейкхолдерами.

Управление стейкхолдерами – сравнительно новая область знаний в управлении проектами. Чаще всего, учебники и статьи ограничиваются рассмотрением двух заинтересованных лиц – заказчика, инвестора (спонсора). Однако их список гораздо больше. В действительности, управление стейкхолдерами достаточно глубокая и более объемная сфера деятельности, о чем и будет говориться в данной статье. От правильной работы с людьми, которые имеют отношение к проекту и могут оказать на него влияние, зависит успех проекта в целом. Грамотно выстроенное взаимодействие со стейкхолдерами позволит достичь более целостного подхода к управлению проектами. Изначально данная область появилась как один из подходов стратегического менеджмента.

Стейкхолдеры (stakeholders или заинтересованные стороны):

- это физические лица или организации, имеющие права, долю, требования или интересы относительно системы или ее свойств, удовлетворяющих их потребностям и ожиданиям [2];
- это физические лица, совокупность физических лиц или организаций, которые могут оказать влияние на ход осуществления проекта или которые сами ощущают влияние результатов проектов на себе [7].

Приблизительный перечень стейкхолдеров представлен на рис. 1, он также может расширяться и дополняться в зависимости от специфики проекта.



Рис. 1. Перечень стейкхолдеров проекта

Из рисунка 1 видно, что стейкхолдерами могут быть как непосредственные участники проекта, так и те, кого проект напрямую не касается, но кто может существенно повлиять на него, т.е. заинтересованных лиц можно разделить на внутренних и внешних соответственно. Первые непосредственно влияют на стратегическую и операционную деятельность компании, вторые – на стратегию компании [5].

Любое воздействие стейкхолдеров оказывает существенное влияние на успех деятельности организации или проекта. Воздействия могут быть как положительными, так и отрицательными: эффективная – неэффективная работа команды, приверженность марке – негативные отзывы, поставка товаров в срок – срывы сроков поставки и т.д. Соответственно, следует усиливать положительное влияние стейкхолдеров на проект и минимизировать негативное, чтобы проект был успешен – это одна из главных задач в рамках управления стейкхолдерами.

Грамотно выстроенное взаимодействие со стейкхолдерами: уменьшает затраты времени на выполнение работ, снижает простои; снижает вероятность наступления рисков; увеличивает доход от проекта; повышает лояльность членов команды и всех остальных участников к работе в проекте; формирует благоприятную рабочую атмосферу; формирует устойчивые связи между участниками проекта.

Эдвард Фримен, прародитель управления стейкхолдерами, считал, что выделение и понимание группы людей, оказывающих влияние на проект, способствует структурированию и оптимизации процесса управления [7]. Он выделял следующие два основных принципа:

1. Управление проектом/компанией должно осуществляться с учетом интересов всех стейкхолдеров и с участием заинтересованных лиц в принятии решений.

2. Менеджер проекта должен выступать агентом стейкхолдеров и действовать в соответствии с их интересами.

Данные принципы несколько утопичны, что также замечает автор одной из статей – Ю. Е. Благов, ведь возможны элементарные противоречия интересов между стейкхолдерами [3]. Эдвард Фримен делал упор именно на выявление потребностей заинтересованных лиц и их реализации в процессе управления. Безусловно, понимание потребностей заинтересованных сторон – еще одна важная задача в рамках управления стейкхолдерами [7]. Ведь чтобы получить максимальную отдачу от людей, нужно знать о них несколько больше, чем просто результаты, которые они производят. Необходимо сосредоточиться на изучении их отношения к делу, мотивации и всех факторов, которые заставляют их действовать. Данная информация поможет сформировать взаимодействие таким образом, что позволит получить то, что необходимо для целей проекта. Однако, если данные потребности противоречат интересам проекта, то важно понимать долю риска, исходящего от данного заинтересованного лица.

Налаживать взаимодействия со всеми стейкхолдерами сразу достаточно сложно. Щербаков П. С. в своей статье отмечает, что необходимо выстраивать взаимодействия и коммуникации с заинтересованными лицами, исходя из стра-

тегии компании/проекта [5]. План проекта поможет в выявлении ключевых его участников. Важно понимать, что следует выделять приоритетность работы с каждым конкретным стейкхолдером, исходя из его важности для проекта и степени возможного риска, исходящего от него. Из всего вышесказанного ясно, что необходимо достичь баланса между реализацией интересов как стейкхолдеров, так и интересов самого проекта – следующая важная задача управления заинтересованными лицами. Эту идею можно проследить и в работах И. Ансоффа. Он также считал, что нужно проводить мониторинг заинтересованных лиц, выявлять важных из них и налаживать совместное взаимодействие [1].

Область управления стейкхолдерами проекта, как было сказано, сформировалась сравнительно недавно. Она выделяется как отдельная и самостоятельная область лишь в 5 издании PMBOK Guide. Процесс управления стейкхолдерами включает в себя 4 этапа:

- 1 этап. Выявление заинтересованных лиц.
- 2 этап. Планирование управления заинтересованными лицами.
- 3 этап. Организация взаимодействия между заинтересованными лицами.
- 4 этап. Контроль взаимодействия с заинтересованными лицами.

Каждый из этих этапов представляет собой процесс, имеющий в себе вход, выход и соответствующий набор методов и инструментов, некоторые из них: оценка экспертов, совещания, методы коммуникации и др. [6].

При этом управление заинтересованными лицами тесно пересекается с рядом других областей управления проектами и оказывает на них то или иное влияние.

1. Управление рисками. Негативное воздействие, которое может исходить от стейкхолдеров, является укрупненным перечнем рисков, с которыми может столкнуться проект. Решая задачу управления стейкхолдерами, менеджер автоматически сглаживает часть рисков по проекту.

2. Управление человеческими ресурсами. Команда проекта, сотрудники являются одной из заинтересованных сторон проекта. Грамотный подбор, выстраивание системы мотивации и развития позволяют достичь эффективной работы команды проектами и наладить их сотрудничество с другими участниками.

3. Управление поставками. Поставки являются важной частью проекта. Именно от взаимодействия с поставщиками будет зависеть выполнение сроков поставки и своевременность получения необходимого материала в должном объеме и необходимого качества.

4. Управление содержанием (предметной областью). Эта область управления, связанная с постановкой целей на проект, планированием ожидаемых

результатов, определением характеристик проекта и распределением ответственности между всеми участниками проекта. Безусловно, данная система предполагает взаимодействие между всеми участниками проекта и, соответственно, с заинтересованными лицами.

5. Управление коммуникациями. Позволяет настроить бесперебойное поступление и обмен информацией между участниками проекта, улучшить их взаимодействие и управлять ими. Именно данная область лежит в основе управления стейкхолдерами.

Эффективность управления заинтересованными лицами позволит достичь успеха в других областях управления проектами. Также можно считать верным и обратное утверждение: эффективная работа управления областями проекта говорит о грамотно выстроенном взаимодействии со стейкхолдерами.

Управление стейкхолдерами гораздо шире понятия управления командой проекта. Задача проект-менеджера – сформировать взаимоотношения между проектной командой и остальными стейкхолдерами. Это требует крайне сложных коммуникаций. Сформировав структуру взаимодействия, нужно обеспечить ее бесперебойное функционирование на протяжении всего жизненного цикла проекта и удостовериться, что она позволяет реализовывать важную задачу – удовлетворение потребностей всех стейкхолдеров проекта.

Ранее было замечено, что управление стейкхолдерами тесно связано с управлением коммуникациями. В своей книге «Управление проектами» А. И. Балашов и Е. М. Рогова, одни из немногих, выделяют область управления ожиданиями стейкхолдеров проекта и включают ее в раздел управления коммуникациями. С одной стороны, это оправданно, так как основными методами, используемыми при управлении заинтересованными лицами, являются различные коммуникационные технологии.

С другой стороны, как уже обсуждалось ранее, если провести анализ всех лиц, выступающих стейкхолдерами, то мы поймем, что управлять заинтересованными лицами – это значит не только грамотно управлять коммуникациями, но и управлять поставками, человеческими ресурсами, рисками и содержанием. Это делает управление стейкхолдерами более обширным и многокомпонентным понятием. Следовательно, управлять заинтересованными лицами проекта можно, делегировав работу с каждым конкретным стейкхолдером менеджеру команды, который отвечает за данное направление деятельности. Например, менеджер по маркетингу проекта отвечает за взаимодействие с клиентами, менеджер по снабжению – за поставщиков. Это позволит существенно снизить нагрузку с самого менеджера проекта, но при этом гармонично позаботиться о взаимодействии со всеми заинтересованными лицами.

В итоге получается, что взаимодействие со стейкхолдерами и управление ими сводится к применению методов и основ управления коммуникациями и человеческими ресурсами в рамках управления такими областями проекта как: поставки (контракты), содержание проекта, риски проекта.

В ходе работы над данной статьей было выявлено несколько задач, стоящих перед управлением стейкхолдерами и проект-менеджером. Одна из них – это налаживание работы механизмов управления коммуникациями и человеческими ресурсами, достижения системного управления поставками, содержанием, рисками. Реализация данной задачи позволит организовать слаженность работ по проекту в целом и выполнить каждую конкретную задачу, стоящую перед сферой управления стейкхолдерами проекта по отдельности.

Список использованных источников

1. Ансофф, И. Новая корпоративная стратегия / И. Ансофф. – СПб. : Питер Ком, 1999. – 416 с. – (Серия «Теория и практика менеджмента»).
2. Управление проектами : учебник для бакалавров / А. И. Балашов, Е. М. Рогова, М. В. Тихонова, Н. А. Ткаченко. – М. : Юрайт. – 2013. – 383 с.
3. Благов, Ю. Е. Классика теории менеджмента / Ю. Е. Благов // Вестник С.-Петербур. ун-та. Сер. Менеджмент. – 2012. – Вып. 1. – С. 109 – 116.
4. Фурта, С. Д. Управление стейкхолдерами проекта: ревизия 5-го издания PMBOK® Guide. Ч. II. Инициативы XXI века / С. Д. Фурта, Т. Б. Соломатина, Т. Хопл. – 2014. – С. 27 – 42.
5. Щербаченко, П. С. Управление взаимодействием со стейкхолдерами в российских компаниях / П. С. Щербаченко // Вестник ГУУ. – 2018. – № 5. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-vzaimodeystviem-so-steykholde-rami-v-rossiyskih-kompaniyah> (дата обращения: 14.07.2019).
6. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), 5th Edition, Project Management Institute (PMI), 2012.
7. Freeman, R. E. Strategic Management: a Stakeholder Approach. – Boston : Pitman, 1982.

С. А. Баркалов, П. Н. Курочка, О. С. Перевалова
(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

ИСТОРИЯ ПРОЕКТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В РОССИИ

Аннотация. Рассматриваются истоки возникновения проектно-ориентированного управления в России на примере строительства Транссибирской железнодорожной магистрали.

S. A. Barkalov, P. N. Kurochka, O. S. Perevalova
(Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia)

HISTORY OF PROJECT MANAGEMENT IN RUSSIA

Abstract. The sources of the emergence of project-oriented management in Russia are examined on the example of the construction of the Trans-Siberian Railway.

Интерес к проектным формам управления, прежде всего, связан с так называемым управленческим дуализмом. Любая организация по сути дела выполняет двойственную задачу: с одной стороны, ее деятельность направлена на достижение целей, записанных в уставе организации, а с другой, для того чтобы достичь этих программных целей организация должна все-таки, в первую очередь, обеспечить свое нормальное состояние в течении достаточно длительного срока, позволяющего реализовать основные задачи, поставленные перед фирмой. Так вот, задача обеспечения достаточно длительного функционирования предприятия предполагает выполнение целого ряда функций, напрямую не связанных с основной деятельностью предприятия.

В этом случае наиболее подходящей организационной структурой видится структура, обладающая гибкостью, т.е. свойство жесткости сведено до минимума. Объясняется это тем, что в постоянно меняющейся экономической действительности нет постоянных задач, стоящих перед предприятием, но есть постоянные интересы, для обеспечения которых приходится решать различные наборы задач, причем эти задачи могут быстро и кардинально изменяться. А, следовательно, под измененные задачи требуется и измененная организационная структура. Возникает дилемма: как же быть? Менять оргструктуру предприятия ежемесячно, а может еженедельно? Ситуация на рынке может быть очень динамичной. Но кто же это все будет выполнять?

Выход видится в создании максимально гибких структур, реализующих принципы проектного управления. Особенностью таких структур является заложенная в них возможность учета управленческого дуализма, позволяющего

выстроить не только управленческую вертикаль, отдельные ветви которой практически слабо связаны друг с другом, но и скрепить эти вертикальные ветви горизонтальными связями, реализующими возможность эффективного выполнения основных программных задач предприятия.

Все это ясно в настоящее время, но более ста лет назад многие очевидные сейчас проблемы даже не формулировались, и о их существовании только начинали догадываться. Но тем не менее экономические реалии даже того времени требовали отхода от патриархальных методов организации производства. Это особенно ярко проявляется на примере реализации в дореволюционной России мегапроекта, который можно поставить с один ряд с атомным и космическим проектами середины XX века. Речь в данном случае идет о строительстве Транссибирской магистрали.

Первопричиной обращения правительства и самого императора к восточному фасаду империи было связано с предметным уроком, преподанным американцами, по отторжению Аляски в 1867 году. Постепенно стало приходить понимание того, что освоением территорий необходимо заниматься на постоянной основе. В связи с этим и возник проект строительства Транссибирской магистрали, соединяющей центральную Россию (железная дорога к моменту начала строительства доходила только до г. Миасс, относящегося в настоящее время к Челябинской области) с портом Владивосток. При этом предполагалось, что появление железной дороги даст мощный толчок к экономическому развитию территорий, находящихся в зоне ее доступности.

В итоге было принято решение о начале строительства Великого Сибирского пути в феврале 1891 года. При этом, понимая грандиозность стоящих перед строителями задач, инициаторы начала строительства нашли очень верный подход к организации управления ходом реализации задуманных планов: был организован межведомственный орган, получивший название Комитет Сибирской железной дороги (КСЖД). В Комитет по должности входили председатель комитета министров, т.е. премьер-министр в качестве заместителя председателя, а также министры: финансов, путей сообщения, внутренних дел, земледелия и государственных имуществ, военный и морской, а также государственный контролер. Председателем стал наследник престола, будущий император Николай II. Кстати, став императором, он, понимая значимость происходящего, этот пост оставил за собой. Таким образом было обеспечено соблюдение одного из главных принципов проектного управления – это принцип «первого руководителя».

Таким образом, был создан орган, позволяющий обеспечить в современном понимании все необходимые условия реализации технологий проектного управления.

Вся предполагаемая трасса будущего строительства была поделена на шесть участков. Комитет на одном из первых своих заседаний озвучил принципы, на которых предполагается строительство дороги: «...чтобы Сибирская железная дорога, это великое народное дело, была осуществлена русскими людьми и из русских материалов» [1]. А главное – строить за счет казны.

В ходе реализации столь грандиозного проекта, требовавшего во многих случаях нестандартного подхода к стоящим проблемам, естественно появлялись новые, часто просто уникальные, подходы. Так в процессе графического моделирования хода работ русскими инженерами, взамен распространенных в то время графиков Гантта, была предложена новая форма представления данных, позднее получившая название циклограммы [2].

В принципе, если изучить внимательно историю возведения практически любого объекта на Транссибирской магистрали, то там можно найти истинные изюминки инженерной мысли, к сожалению, очень часто безвозвратно утраченные. Понятно, что все объекты охватить мы вряд ли сумеем, но остановимся на наиболее ярких, создание которых привнесло в практику строительства целый «букет» новых идей. Речь в данном случае пойдет о возведении моста через Енисей в Красноярске.

Здесь как раз-таки сошлось именно все в режиме наибольшего благоприятствования: автором проекта мостового сооружения был известный в то время инженер Лавр Дмитриевич Проскураков (1858 – 1926), а руководителем стройки – тоже известный инженер Евгений Карлович Кнорре (1848 – 1917).

Проект будущего моста был сделан практически в рекордно короткие сроки: проектировщику для этого понадобилось всего четыре месяца. Но, как говорится, сделать – это одно, еще это все надо согласовать и утвердить.

И вот здесь в полной мере проявились элементы проектного управления, реализованные в виде межведомственного Комитета Сибирской железной дороги, позволившего наладить горизонтальные связи между различными ведомствами, региональными администрациями. Эти преимущества дали возможность проекту, представленный Л. Д. Проскураковым, согласовать и утвердить в течение месяца! И это при том, что сам проект поражал своей уникальностью и вызывал возражения у определенной части специалистов.

Уникальность проекта заключалась в целом спектре свойств проектируемого моста: размеры, применяемые методы расчета, конструктивные особенности, предполагаемые сроки возведения. Это был практически на тот момент времени самый крупный мост в России с длиной пролета 144,5 метра, максимальная высота параболы, венчавшей каждый пролет, составляла 27 метров.

Но это были находки проектировщика. Не отставал от него и руководивший строительством Е. К. Кнорре. Его «находки» находились в области органи-

зационно-технологических решений, принимаемых по ходу строительства моста. Попробуем кратко перечислить основные.

Учитывая сложность строительства: стремительное течение; частые паводки в летне-весеннее время; глубину реки; сложное дно, не позволяющее закрепить якоря; ограниченные сроки строительства: всего три года, Е. К. Кнорре принял решение о выполнении основных работ по возведению моста в ... зимнее время. В данном случае было найдено решение, позволяющее поставить на службу строителям суровую сибирскую зиму.

Для этого под создаваемые опоры готовились шахты методом вымораживания. На берегу были развернуты необходимые мастерские, позволяющие изготавливать основные конструкции моста на месте. Кстати, это решение тоже на тот момент было достаточно нетрадиционным. На берегу круглогодично велись работы по созданию пролетов моста, которые по мере готовности в зимнее время методом надвигки выставлялись в проектное положение. Учитывая вес каждого пролета – 900 тонн, эта операция также потребовала многих неординарных инженерных решений.

Весной 1899 года прошли испытания уже построенного моста, которые заключались в том, что по мосту пускался тяжелогруженный состав из нескольких паровозов и груженых вагонов. По сложившейся традиции русского инженерного корпуса – нести личную ответственность за принятые решения – на одном из паровозов вместе с локомотивной бригадой находился и главный строитель моста Е. К. Кнорре.

В книге-отчете о строительстве он написал: «Мост через реку Енисей мной заложен с запасом прочности в 52 раза, дабы бог и потомки никогда не сказали обиды мне».

Это один из эпизодов, связанных с реализацией российского мегапроекта строительства Транссибирской магистрали. Ниже в таблице дана динамика роста протяженности железных дорог России в начале XX века.

Протяженность железнодорожной сети России

Годы	1900	1901	1902	1903	1904	1905	1906	1907
Протяженность, км	53 234	56 462	57 599	58 362	59 616	61 085	63 623	65 500
Прирост, км	–	3218	1147	763	1254	1469	2538	1877
Годы	1908	1909	1910	1911	1912	1913	1914	
Протяженность, км	65 919	66 345	66 581	68 027	68 954	70 156	73 022	
Прирост, км	419	426	236	1446	927	1202	2866	

С завершением строительства Алексеевского моста в Хабаровске, мега-проект по строительству Транссибирской железнодорожной магистрали можно было считать полностью реализованным, но для всего корпуса русских инженеров возникал исконно русский вопрос: «Что делать?». Правда в отличие от рефлекслирующих героев классической русской литературы этот вопрос, дополненный еще одним словом, звучал немного по-другому: «Что делать *далее?*». И вот для ответа на этот, далеко не простой, вопрос в январе 1916 года, напомним Россия в ту пору несколько лет вела тяжелую войну, получившую в последствии название Первой мировой, было создано «Особое междуведомственное совещание по выработке плана железнодорожного строительства на предстоящее пятилетие 1917 – 1922 гг.», куда вошли представители целого ряда министерств и государственных органов: члены Думы, Госсовета, влиятельного Императорского русского технического общества, министерства путей сообщения и др.

Специальным заседанием Комиссии о новых железных дорогах было принято решение о развитии горнодобывающей и золотодобывающей отраслей промышленности приленского края путем проведения железной дороги от Транссибирской магистрали через город Братск вплоть до Бодайбо (через Усть-Кут). В дальнейшем строились планы дотянуть железную дорогу до Якутии. Учитывая, что уже было сделано русскими инженерами и рабочими эти планы не казались фантастическими.

Список использованных источников

1. Баркалов, С. А. История управления проектами в России. Через Китай к Тихому океану. Ч. 1 / С. А. Баркалов, П. Н. Курочка // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Управление строительством. – 2018. – № 3 (12). – С. 6 – 28.
2. Математические основы управления проектами / под ред. В. Н. Буркова. – М. : Высш. шк., 2005. – 423 с.

Я. С. Строганова, А. А. Волкова

(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

СБАЛАНСИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАК ПРОЦЕСС ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТРАТЕГИИ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Аннотация. Рассмотрены теоретические основы построения системы сбалансированных показателей при разработке стратегии строительной организации, главные аспекты стратегического планирования для выявления целей и миссии компании. В статье отражены знания, касающиеся системы сбалансированных показателей стратегического планирования.

BALANCED SCORECARD SYSTEM AS A PROCESS OF THE STRATEGY FOR BUILDING

Abstract. This article deals with the theoretical basis for building a balanced scorecard in the development strategy of a construction company, the main aspects of strategic planning to identify the goals and mission of the company. The article reflects the knowledge regarding the balanced scorecard strategic planning.

Введение. Актуальность темы данной статьи обусловлена тем, что при постоянном развитии и изменении экономики организации должны уметь быстро адаптироваться к внешним условиям, поэтому правильно сформулированная стратегия организации, а также ее успешная реализация является залогом ее успешного функционирования.

Таким образом, одним из инструментов процесса представления стратегии выступает сбалансированная система показателей. Данная система позволяет связать как финансовые, так и нефинансовые показатели, долгосрочные и краткосрочные цели.

1. Теоретические основы стратегического планирования, определение целей и миссии организации. Сущность стратегического планирования строительной организации заключается в определении хозяйственных задач, в конкретизации цели для каждого подразделения, а также в выявлении финансовых, трудовых и материальных ресурсов, необходимых для решения поставленных целей и задач. Стратегическое планирование строительной организации можно определить как функцию управления, которая состоит в своевременном учете внешних и внутренних факторов, обеспечивающих нормальное функционирование организации, а также в обеспечении рыночного спроса и определении основных направлений развития производственных мощностей. Стратегическое планирование также необходимо связывать с маркетингом и контролем, для того чтобы корректировать показатели на рынке, поскольку стратегическое планирование – это планирование спроса, анализ ресурсов и оценка перспектив. Стратегическое планирование в первую очередь обеспечивает взаимосвязь между всеми подразделениями организации, разрабатывает комплекс мероприятий, позволяющих достичь целей организации. Перспективное стратегическое планирование определяет общие цели и направления, т.е. текущие планы направлены на практическое достижение поставленных целей. Текущие планы развивают, корректируют и дополняют направления развития организации.

Одним из элементов стратегического планирования является миссия организации, которая представляет собой философию и смысл существования организации. В данном понятии она определяет ценности, принципы, на основании которых организация осуществляет деятельность.

Для выполнения миссии организации необходимо выделить стратегические цели, которые в будущем будут способствовать успешной деятельности компании и ее благоприятному развитию. Сущность стратегических целей состоит в разработке видения, измеримого и конкретного. Цели формируются высшим руководством, и составляют для миссии.

Качество планирования определяется:

1. Квалифицированным персоналом, работающим в организации;
2. Уровнем компетентности руководства;
3. Обеспеченностью программными составляющими (продуктами);
4. Информационной базой.

Планирование – это политика действий, разработка мер, обоснованный выбор целей, база для дальнейшего принятия долгосрочных решений.

Существует три вида планирования в зависимости от направленности и решаемых задач:

1. Стратегическое;
2. Среднесрочное;
3. Текущее.

Исходя из вышеизложенного, стратегическое планирование – это инструмент, помогающий в процессе принятия управленческих решений. Данный процесс требует как формальных, так и неформальных процедур. Задача планирования заключается в нововведениях, которые помогут адекватно реагировать на внешние изменения среды. Планирование стратегии не является моментным действием, это установление общих направлений, направленных на рост и укрепление организации.

2. Сущность системы сбалансированных показателей. Рассмотрим сбалансированную систему показателей (BSC) BalancedScorecard. Данная система была разработана и представлена в середине 90-х годов XX века Робертом Капланом и Дэйвидом Нортоном. Ими было проведено исследование 12 организаций, которое показало, что в большинстве случаев за основу взяты финансовые показатели. Организации в целях улучшения своего финансового положения сокращали расходы на обслуживание клиентов, расходы на обучение персонала, рекламу, но это только хуже сказывалось на финансовом положении. Разработчики данной системы пришли к выводу, что сотрудники не понимают своего места в реализации стратегии организации. Для данной системы разработано программное обеспечение, которым пользуются крупнейшие компании мира. Идея разработки данной системы возникла с целью повышения эффективности достижения стратегических целей организации. ССП во многом

схожа с предыдущими системами управления, но она отличается от них. Ее новшество состоит в том, что система позволяет связать стратегию организации с ежедневными задачами сотрудников.

Суть концепции заключается в том, чтобы определить стратегию компании через определенный формат, который объединял бы ограниченный круг показателей. Круг показателей не должен включать только финансовые показатели. Система показателей – универсальный инструмент, с помощью которого можно стимулировать и координировать деятельность людей.

Основная организационная идея ССП – доведение до каждого сотрудника информации о стратегических целях организации и роли сотрудника в достижении этих целей, оценке и мотивации персонала через сбалансированную систему показателей.

Итак, управление на основе ССП позволяет руководителю компании:

- 1) оценить стратегию и цели компании;
- 2) действенно принимать необходимые меры при изменениях во внутренней и внешней среде;
- 3) устранить разрыв между целями компании и их операционной реализацией;
- 4) оценить отдачу любого проекта;
- 5) совместить цели компании с деятельностью персонала.

Принципы построения ССП:

- 1) показатели должны отображать нематериальные и материальные активы, и аспекты бизнеса;
- 2) показатели должны отображать результаты и опережающие факторы;
- 3) необходимо минимизировать количество показателей, поскольку, невозможно принять эффективное управленческое решение, анализируя большое количество показателей;
- 4) все показатели должны быть взаимосвязаны между собой, чтобы организация могла использовать синергетический эффект, потому что возможно снижение эффективности из-за противостояния противоречиям;
- 5) цели и показатели эффективности должны быть измеримы. Сюда включаются так же показатели, которые отражают нематериальные аспекты (лояльность клиента);
- 6) необходимо визуализировать цели и стратегию через карту;
- 7) стратегия и цель организации должны быть известным всем сотрудникам на всех уровнях управления;
- 8) поддержание обратной связи для проверки правильности причинно-следственных связей в системе.

Сбалансированной она называется потому, что объединяет в себе как финансовые, так и нефинансовые показатели.

Преимущества и недостатки. Данная система имеет как положительные, так и отрицательные стороны.

Плюсы внедрения:

1) внедрение ССП позволит заново пересмотреть стратегию, цели и задачи компании. Позволит взглянуть на компанию с новой стороны, выявить существующие проблемы;

2) в системе учитываются не только финансовые показатели, но так же и нематериальные активы;

3) возможно избежание кризисных ситуаций;

4) стратегические цели, задачи понятны каждому сотруднику на всех уровнях управления;

5) охватывает все стороны деятельности компании.

Недостатки:

1) трудности внедрения.

2) при реализации стратегии выявляется, что отсутствует связь между стратегическими целями организации и целями работников.

3) разработанная стратегия не соответствует реальным ресурсам и технологиям компании.

4) анализ обратной связи акцентирует внимание на тактических целях, а не стратегических. ССП станет эффективным инструментом только тогда, когда работники будут достойно вознаграждены за свой труд.

Таким образом, ССП – особая система управления, которая позволяет оценивать результаты деятельности сотрудников, а также дающая менеджменту перевести стратегические цели компании в четкий план оперативной деятельности с помощью ключевых показателей.

Н. И. Базенков¹, М. С. Сандомирская²

(¹Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
Москва, Россия;

²Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ЦЕН В ИНТЕРНЕТ-ТОРГОВЛЕ: МОДЕЛИ ОГРАНИЧЕННОЙ РАЦИОНАЛЬНОСТИ

Аннотация. Посвящена экспериментальной проверке трех моделей поведения ограниченно-рациональных агентов. Используются данные о ценах на 30 товаров, доступных с июля по октябрь 2015 года на площадке Яндекс.Маркет. Из трех моделей только одна – равновесие дискретного отклика – удовлетворительно описывает реальные распределения цен.

STUDY OF PRICE DISPERSION IN ONLINE SALES: BOUNDED RATIONALITY MODELS

Abstract. We present an experimental study of three bounded rationality models. We collected price data for 30 goods available from 2015, July to October on the marketplace Market.Yandex.ru. The study reveals that only one model – quantal response equilibrium – matches the data reasonably well.

Введение. Онлайн-рынки по многим параметрам близки к рынкам с идеальной конкуренцией. Для них характерен низкий порог входа, доступность информации о товарах и ценах, возможность гибко изменять цену в зависимости от текущей ситуации. Классические модели конкуренции предсказывают, что в таких условиях один и тот же товар должен стоить практически одинаково во всех магазинах. Однако многочисленные исследования показывают, что для реальных онлайн-рынков характерен существенный разброс цен даже на одинаковые товары [1, 2].

Существует несколько подходов к объяснению этого явления [3]. Много исследований посвящено вопросам неравномерной информированности покупателей и процессам поиска информации о товаре. С другой стороны, в [1] показано, что дисперсия цен наблюдается даже в лабораторных экспериментах, где покупатели предполагаются идеально информированными и рациональными. Значит, дисперсия может возникать вследствие ограниченно-рационального поведения продавцов.

Наше исследование посвящено экспериментальной проверке трех моделей конкуренции на онлайн-рынках. Модели ϵ -равновесия и равновесия дискретного отклика, предложенные в [1], рассматривают дисперсию цен как результат конкуренции ограниченно-рациональных продавцов. Модель с лояльными покупателями, предложенная в [4], предполагает, что продавцы действуют рационально, но есть некоторая доля покупателей, которая не анализирует все доступные цены, а просто покупает товар у случайно выбранного продавца. Все три модели успешно объясняли поведение людей в лабораторных экспериментах. Мы провели верификацию этих моделей на реальных ценах, скачанных с платформы Яндекс.Маркет.

Соответствие реальных распределений цен и предсказанных каждой моделью оценивалось тремя статистическими тестами: на равенство средних значений, равенство медиан, и равенство частот по критерию χ^2 . Результаты исследования показали, что из трех моделей только равновесие дискретного отклика

объясняет наблюдаемые распределения лучше, чем предположение, что магазины назначают случайные цены.

Модели ограниченной рациональности. Мы рассматриваем три модели, предложенные в [1, 3] как возможное объяснение наблюдаемой дисперсии цен.

Ценовая конкуренция с однородным товаром

В основе моделей лежит классическая конкуренция Бертрана. Есть n фирм, которые продают одинаковый товар. Каждая фирма i назначает цену $p_i \in [c, p^m]$, где c – себестоимость товара, p^m – монопольная, т.е. максимально возможная, цена. Покупатели всегда выбирают самый дешевый товар, т.е. прибыль делят между собой фирмы, назначившие минимальную цену. При такой конкуренции в равновесии Нэша все фирмы назначают цену, равную издержкам $p_i = c$, что противоречит наблюдаемым распределениям цен. В [1] авторы расширили базовую формулировку двумя моделями ограниченно-рациональных продавцов.

1. *ε-равновесие.* Фирмы не чувствительны к изменениям выигрыша меньше, чем заданный порог ε . При таком поведении продавцов цены имеют следующую кумулятивную функцию распределения:

$$F_i^\varepsilon(p) = \begin{cases} 0, & p < c + \theta \\ 1 - \left(\frac{\theta}{p-c}\right)^{1/n-1}, & p \in [c + \theta, p^m), \\ 1, & p \geq p^m \end{cases} \quad (1)$$

где $\theta = \left[\varepsilon^{n-1} \left(\frac{n}{n-1}\right)^{n-1} (p^m - c) \right]^{1/n}$.

2. *Равновесие дискретного отклика (quantal response equilibrium).* Вероятность выбора определенной цены пропорциональна ожидаемой прибыли при фиксированных распределениях цен конкурентов. Распределение цен в РДО имеет следующий вид:

$$F_i^{QRE}(p) = \begin{cases} 0, & p < c \\ 1 - \left(1 - \left(\frac{p-c}{p^m-c}\right)^{1+\lambda}\right)^{1/1+\lambda-n\lambda}, & p \in [c, p^m), \\ 1, & p \geq p^m \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $\lambda \in [0, (n-1)^{-1}]$ – степень рациональности агентов. При $\lambda = 0$ агенты действуют случайно, при $\lambda = (n-1)^{-1}$ РДО становится равновесием Нэша.

Конкуренция с лояльными покупателями

В [4] добавлено предположение, что некоторая доля покупателей, $\alpha \in [0, 1]$, выбирает не самый дешевый товар, а покупает у случайно выбранного магазина. Считается, что эти покупатели лояльны к своему магазину, и по-

купают у него по любой цене. Сами магазины при этом рациональны. В такой модели распределение цен задается уравнением:

$$F_i^\alpha(p) = \begin{cases} 0, & p < p^0 \\ 1 - \left(\frac{1-\alpha}{\alpha n} \frac{p^m - p}{p - c} \right)^{1/n-1}, & p \in [p^0, p^m) \\ 1, & p \geq p^m \end{cases} \quad (3)$$

где $p^0 = \frac{p^m(1-\alpha) + \alpha n c}{1-\alpha + \alpha n}$.

Результаты. Для исследования использовались данные платформы Яндекс.Маркет. В выборку вошли на 30 наиболее популярных товаров в категории «крупная бытовая техника» с 24 июля по 12 октября 2015 года. Всего выборка содержит 258 магазинов, 324 временных среза и 463 502 ценовых предложения.

Цены на каждый товар представляют собой набор векторов p^1, \dots, p^T , где p^t – вектор всех цен на этот товар в момент времени t . Число элементов каждого вектора, как правило, отличается, поскольку в разные моменты времени меняется количество магазинов, продающих товар. Данные были сгруппированы таким образом, что каждая группа содержит близкие моменты времени с одинаковым числом продавцов n и количество цен в группе не меньше $N = 25$. Для каждой группы выполнялась независимая оценка параметров.

Каждая модель из перечисленных выше содержит три параметра: затраты c , монопольная цена p^m и параметр, характеризующий поведение агентов $(\varepsilon, \lambda, \alpha)$. Затраты и монопольная цена для каждой группы оценивались как минимальная и максимальная цена в группе, соответственно. Третий параметр оценивался как минимум суммы квадратов разностей между эмпирической и теоретической кумулятивными функциями распределения, аналогично [1].

После оценки параметров выполнялись три статистических теста. Близость наблюдаемого и теоретического среднего значения оценивалась t-тестом. Знаковый тест использовался для сравнения наблюдаемой и теоретической медианы. Соответствие формы распределения теоретической модели оценивалось тестом хи-квадрат. Использовалось 5 интервалов, выбранных таким образом, чтобы ожидаемые частоты были равны для всех интервалов. Уровень значимости для всех тестов был $p = 0,05$.

Для оценки эффективности каждой гипотезы мы вычислили долю всех моментов времени, когда нулевая гипотеза о равенстве модельных и наблюдаемых параметров не отвергалась тестами. Результаты суммированы в табл. 1. В четвертом столбце приведена эффективность гипотезы, что цены назначались случайным образом.

Результаты показали, что относительно успешно наблюдаемые цены объясняет только равновесие дискретного отклика. Эта модель очень хорошо предсказывает центр распределения и намного лучше других моделей предсказывает форму. Две другие модели показали эффективность хуже, чем случайно на-

значаемые цены. Это объясняется, в частности тем, что и ε -равновесие, и модель лояльных покупателей предполагают, что с ростом числа продавцов n будет расти концентрация цен по краям распределения – в районе минимальной и монопольной цены. В реальности же такого не наблюдается.

1. Соответствие наблюдаемых параметров предсказаниям модели

Параметр распределения	ε -равновесие	РДО	Лояльные покупатели	Случайные цены
Среднее	14%	95%	15%	14%
Медиана	5%	88%	9%	15%
Форма распределения	0,1%	16%	0,4%	0,4%

Заключение. Целью исследования было проверить на реальных данных три модели ограниченной рациональности, которые в литературе предлагались в качестве объяснения высокой дисперсии цен в онлайн-торговле. Результаты показали, что только одна модель – равновесие дискретного отклика – объясняет наблюдаемые данные лучше, чем модель случайных цен.

Существенным недостатком всех рассмотренных моделей является предположение об однородности товара и покупателей. На реальных онлайн-рынках предложения разных магазинов отличаются уровнем обслуживания, условиями доставки, качеством сайта и другими параметрами, которые не учитываются в простых моделях конкуренции. В качестве направления дальнейших исследований планируется усложнить модель конкуренции таким образом, чтобы учесть эти особенности онлайн-торговли.

Список использованных источников

1. Baye, M. R. Price Dispersion in the Lab and on the Internet: Theory and Evidence. RAND Journal of Economics / M. R. Baye, J. Morgan. – 2004. – P. 449 – 466.
2. Gorodnichenko, Yu. Price Setting in Online Markets: Does IT Click? Journal of the European Economic Association / Yu. Gorodnichenko, V. Sheremirov, O. Talavera. – 2018. – Vol. 16, No. 6. – P. 1764 – 1811, URL : <https://doi.org/10.1093/jeea/jvx050>
3. Baye, M. R. Information, search, and price dispersion. Handbook on economics and information systems, ed. T. Hendershott. Elsevier / M. R. Baye, J. Morgan, P. Scholten. – 2006. – P. 323 – 375.
4. Morgan, J. An experimental study of price dispersion. Games and Economic Behavior / J. Morgan, H. Orzen, M. Sefton. – 2006. – Vol. 54, No. 1. – P. 134 – 158.

А. М. Ходунов, Н. Ю. Калинина, Н. А. Корнева
(Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМАНДЫ МОЛОДЕЖНЫХ ПРОЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ

Аннотация. Предлагается механизм оценки эффективности команды молодежного проекта, построенный посредством объединения нескольких механизмов управления – распределения объемов работ, распределения ресурсов, коллективного стимулирования и комплексного оценивания.

A. M. Hodunov, N. Yu. Kalinina, N. A. Korneva
(Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia)

ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF TEAM YOUTH PROJECTS ON THE EXAMPLE DESIGN ACTIVITY OF STUDENTS

Abstract. The mechanism of assessment of efficiency of team of the youth project constructed by means of combination of several mechanisms of management – distribution of amounts of works, distribution of resources, collective stimulation and complex estimation is offered.

Творческий и новаторский характер проектной деятельности, которую можно отнести к разряду инновационной, активно привлекает молодежь – одну из самых мобильных и открытых к изменениям возрастных групп. Серьезные изменения в государственной системе образования привели к широкому проникновению методологии управления проектами в образовательные процессы и возникновению новой вузовской практики – проектного обучения [1, 3]. Однако, несмотря на большое количество фундаментальной литературы по управлению проектами, современная проектная деятельность молодых людей лишена формально закрепленных методик оценки их деятельности и требует разработки такого механизма, который учитывал бы все особенности работы данной социально-возрастной группы и позволял бы давать максимально объективную оценку эффективности команд молодежных проектов. Под эффективностью работы команды проекта понимается, согласно [5], категория, отражающая соответствие уровня достижения целей и уровня компетенций команды проекта на всех фазах жизненного цикла проекта его контекстным ограничениям: сложности проблемы, ценности результата и сопротивлению среды.

По своему содержанию возможны следующие варианты молодежных проектов: патриотическое воспитание, добровольчество, здоровый образ жизни, развитие социальных лифтов, профилактика негативных проявлений в молодежной среде, укрепление семейных ценностей и др. Учитывая особенности молодежных проектов [2, 4], можно сделать вывод о том, что для оценки эффективности команды молодежного проекта должна производиться комплексная оценка, в связи с чем возникает необходимость построения такого механизма, который бы отражал комплекс всех влияющих на эффективность работы команды молодежного проекта допущений и ограничений. Предлагаемый в настоящей статье механизм построен посредством объединения сразу нескольких механизмов управления – распределения объемов работ, распределения ресурсов, коллективного стимулирования и комплексного оценивания. Практическое применение механизма осуществлено при оценке молодежной образовательной программы экономики и управления «Интеграция», реализованной командой студентов Воронежского государственного технического университета. Цель программы – комплексное развитие компетенций молодых людей в области управления и экономики и помощь в трудоустройстве. Расходы по проекту «Интеграция», распределенные в соответствии с основными направлениями работ, представлены в табл. 1.

1. Расходы по проекту «Интеграция»

№	Основные направления работы	Сумма расходов, предусмотренная бюджетом проекта, руб.	Сумма фактически произведенных расходов, руб.
1	Работа со спикерами	83 158,00	83 158,00
2	Оплата труда спикеров	211 421,40	211 421,40
3	Работа с волонтерами и участниками проекта	44 860,00	44 860,00
4	Снабжение фирменной продукцией	178 702,32	178 702,32
5	Хозяйственное обеспечение	31 406,28	37 5231,51
Итого		899 548	893 373,23

Для определения эффективности управления командой проекта воспользуемся механизмом:

$$z^*(r; l) = \arg \max_{z \geq 0} [H(z) - C(z; r; l) - \delta],$$

где $z^*(r; l)$ – результат действий n числа агентов (участников проекта), которые выбрали для себя определенный вектор действий $y^*(x) \in Y^*(x)$. $z = Q(y)$, $y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in X'$; $H(z)$ – доход центра (управляющего органа), который зависит от планируемого результата; $C(z; r; l)$ – выплаты агентам (участникам проекта) в зависимости от: z – цели (планируемого результата), r – выполняемых работ, l – имеющегося ресурса; δ – дополнительное стимулирование агентов, где $\delta = \sum_{i \in N} \delta_i$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество агентов.

Для определения того, насколько эффективно было проведено управление командой молодежного проекта, применим предложенную в [40] формулу: $\mathcal{E}_{cy} = (C_{фр} - C_{плр})$, где \mathcal{E}_{cy} – эффективность системы управления проектом; $C_{фр}$ – фактическая себестоимость выполненных работ по проекту; $C_{плр}$ – плановая себестоимость работ по проекту. В нашем конкретном случае решение будет выглядеть следующим образом: $\mathcal{E}_{cy} = (893373,23 - 899548) = -6174,77$ (руб.). Полученное отрицательное значение показывает, что имеет место превышение плановых показателей над фактическим, и подразумевает снижение себестоимости проведенных работ. Это, в свою очередь, отражает общее повышение эффективности управления проектом.

Для того чтобы определить эффективность принятия решений участниками проекта, обратимся к следующему механизму: $G(\theta) = \max_{i \in N} \{F_i(y_i; \theta)\}$, где $G(\theta)$ – общая эффективность принятия решений, зависящая от неопределенности внешних факторов; $F_i(y_i; \theta)$ – эффективность агента, зависящая от: y_i – действий агентов, $i \in N$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество агентов, Θ – фактора неопределенности, который соотносится с определенной ситуацией $\theta \in \Omega$, т.е., от решения одного агента зависит эффективность работы всей команды. Так как целевое использование средств в нашем проекте по сути аналогично оценке эффективности реализации различных муниципальных программ, воспользуемся методикой оценки степени реализаций подпрограмм на уровне территориальных образований [5]. Такой подход в оценке эффективности удобен нам еще и потому, что в нем учитывается влияние результатов деятельности каждого подразделения на общий результат.

Для начала определим степень реализации мероприятий для каждого направления деятельности команды молодежного проекта в качестве доли мероприятий, выполненных в полном объеме по формуле: $CP_M = \frac{M_B}{M}$, где CP_M – степень реализации мероприятий проекта; M_B – количество мероприятий, которые выполнены в полном объеме, из числа мероприятий, которые были запланиро-

ваны, M – общее число мероприятий, запланированных для реализации проекта. В нашем случае степень реализации мероприятий по проекту будет равна:

$$CP_M = \frac{13}{15} = 0,87.$$

Степень соответствия запланированному уровню расходов будем оценивать для каждого направления проектной деятельности как отношение фактически произведенных расходов на их реализацию к плановым значениям: $CC_{уз} = \frac{З_ф}{З_п}$, где $CC_{уз}$ – степень соответствия запланированному уровню расходов; $З_ф$ – сумма фактически произведенных расходов на реализацию одного направления проекта; $З_п$ – сумма расходов на реализацию одного направления проекта, предусмотренная бюджетом проекта.

Оценку эффективности использования средств для каждого направления деятельности (определение эффективности принятие решений руководителем направления) будем рассчитывать по формуле: $\mathcal{E}_{ис} = \frac{CP_M}{CC_{уз}}$, где $\mathcal{E}_{ис}$ – эффективность использования бюджетных средств; CP_M – степень реализации мероприятий проекта; $CC_{уз}$ – степень соответствия запланированному уровню расходов. Так как за каждым направлением реализации молодежного проекта мы подразумеваем людей, команду проекта, то с помощью данного метода вполне достоверно можно определить эффективность принятия решений как на уровне каждого участника, так и на уровне проекта в целом.

Эффективность принятия решений участниками в целом по проекту высчитаем по формуле: $\mathcal{E}_{уч} = \frac{\sum \mathcal{E}_{ис}}{N} \cdot 100\%$, где N – количество участников команды проекта; $\sum \mathcal{E}_{ис}$ – сумма эффективностей использования бюджетных средств участниками команды проекта. Для нашего случая получаем следующее значение: $\mathcal{E}_{уч} = \frac{0,87*5+0,93+0*2+7*1}{15} \cdot 100\% = \frac{12,28}{15} \cdot 100\% = 82\%$. Эффективность принятия решений участниками молодежного проекта признается высокой в случае, если значение $\mathcal{E}_{уч}$ составляет не менее 90%, средней – не менее 80%, удовлетворительной – не менее 70%. В остальных случаях эффективность принятия решений участниками молодежного проекта признается неудовлетворительной.

Далее необходимо провести комплексное оценивание, которое будет заключаться в агрегировании имеющейся информации по определению эффективности команды молодежного проекта (К3) через эффективность командного управления (К1) и эффективность принятия решений командой в условиях влияния внешней среды (К2) (рис. 1). Так, из оценки «отлично» (4) критерия К1 и оценки «хорошо» (3) критерия К2 складывается эффективность команды молодежного проекта с оценкой «отлично» (4) критерия К3.



Рис. 1. Матрица свертки по программе «Интеграция»

Список использованных источников

1. Компетентностный подход в управлении персоналом: оценка, обучение, командообразование / С. А. Баркалов, Т. Е. Давыдова, Н. Ю. Калинина, В. Б. Курносов. – Воронеж : Научная книга, 2010. – 184 с.
2. Гостева, О. В. Эффективная работа команды проекта как условие успешной реализации стратегических целей предприятия / О. В. Гостева // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2009. – № 1 – С. 141 – 144.
3. Калинина, Н. Ю. Профессиональная компетентность преподавателя в сфере управления молодежными проектами / Н. Ю. Калинина, Н. А. Корнева, А. М. Ходунов // Научный вестник Воронежского государственного технического университета. Серия: Управление строительством. 2018. – Вып. № 4(13). – С. 63 – 69.
4. Сапрыка, В. А. Особенности реализации молодежных проектов приграничного сотрудничества / В. А. Сапрыка, И. Н. Гукова, А. В. Пастюк // Межрегиональное и приграничное сотрудничество : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Белгород. – 2014. – С. 124 – 126.
5. Управление проектами: путь к успеху: учебно-методический комплекс / С. А. Баркалов, Е. В. Баутина, О. Н. Бекирова, И. В. Буркова, Т. В. Насонова / Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГТУ». – Воронеж : ООО «Издательство РИТМ», 2017. – С. 415.

В. И. Меньщикова, И. А. Андреева
(Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия)

**УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ
В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА**

Аннотация. Раскрыты содержательные характеристики процесса управления промышленным комплексом как сложной социально-экономической системой в условиях цифровизации. Представлены цифровые технологии, применимые для промышленного сектора экономики, а также технологические тренды цифровой трансформации российской промышленности.

V. I. Menshchikova, I. A. Andreeva
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

**MANAGEMENT OF COMPLEX SOCIO-ECONOMIC
SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF DIGITALIZATION
OF PRODUCTION**

Abstract. The article reveals the substantial characteristics of the process of managing the industrial complex as a complex socio-economic system in the context of digitalization. Digital technologies that are applicable to the industrial sector of the economy, as well as technological trends in the digital transformation of Russian industry, are presented.

В настоящее время в России реализуется Программа развития цифровой экономики в Российской Федерации до 2035 года [3] (далее Программа). В соответствии с Программой развитие экономики страны, ее отдельных секторов, а также систем управления в ближайшие годы осуществляется на основе цифровизации. Еще в 2016 году В. Путиным был предложен запуск «масштабной системной программы развития экономики нового технологического поколения, так называемой цифровой экономики», что было отражено в послании Федеральному собранию 01.12.2016 года [2]. Следовательно, стратегические приоритеты цифрового развития социально-экономических систем определены на государственном уровне, обозначены в ряде национальных проектов и требуют глубокого осмысления и детальной проработки механизмов их реализации.

Рассмотрим более детально, как будет осуществляться управление сложными социально-экономическими системами (например, промышленным комплексом) в условиях цифровизации производства. Отметим, что модернизация традиционных производственных отраслей на фоне цифровизации социально-экономических процессов создает основу для формирования новых рынков и условий их функционирования, а также новых подходов к аналитике, прогнозированию и принятию управленческих решений.

Прежде всего необходимо учесть то, что для достижения поставленных Программой целей необходимо сквозное проникновение цифровых технологий во все отрасли экономики. Для промышленного сектора экономики применим целый ряд различных цифровых технологий, способных повысить эффективность самих производственных процессов, процессов управления ими, производительность труда и т.д. Как отмечают исследователи, «эффективность управления сложными социально-экономическими системами определяется множеством различных по своей природе факторов, где под фактором понимают движущую силу какого-либо процесса (явления) или условие, которое влияет на тот или иной процесс. При исследовании эффективности управления сложными социально-экономическими системами, как правило, выделяют три группы факторов: качество системы, условия функционирования и способы использования» [1]. В условиях цифровизации экономики эти факторы не меняются, а несколько видоизменяются сами процессы управления и технологии.

В исследованиях McKinsey «цифровизация промышленного производства подразумевает интеграцию ряда прорывных технологий: виртуального моделирования, Интернета вещей, робототехники, искусственного интеллекта, больших данных, технологий облачных и граничных вычислений, предиктивной аналитики, новых стандартов связи и др. Цифровизация осуществляется как в рамках систем управления производственными процессами и жизненным циклом продукции, так и дальнейшего обслуживания. Значимую роль в переходе к цифровому производству играет распространение технологий Интернета вещей и использование полученных с IoT-устройств данных для принятия (улучшения) автоматизированных решений и оптимизации промышленного производства. Экономический эффект от внедрения технологий промышленного Интернета вещей к 2025 г. может в мире составить порядка 1,2–3,7 трлн долл.» [5].

На рисунке 1 представлены цифровые технологии, применимые для промышленного сектора экономики.



Рис. 1. Цифровые технологии, применимые для промышленного сектора экономики (составлено автором по [3])

Это предопределяет ряд технологических трендов, которые будут присутствовать в ближайшем будущем российской промышленности, и обусловят ее цифровую трансформацию (рис. 2).

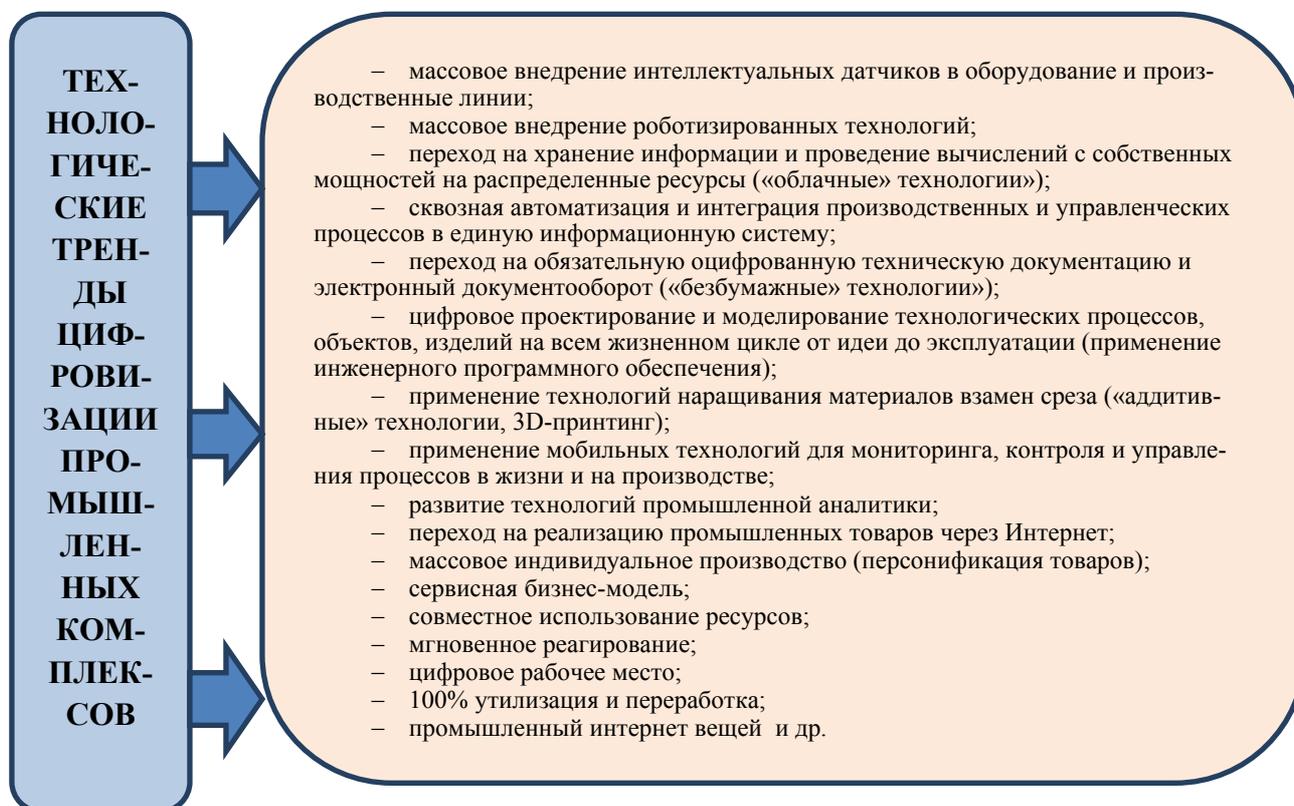


Рис. 2. Технологические тренды в российской промышленности, предопределяющие ее цифровую трансформацию (составлено автором по [3])

При детальном рассмотрении цифровых технологий, применимых для промышленного сектора экономики, а также технологических трендов в российской промышленности, предопределяющих ее цифровую трансформацию, можно выделить две ключевые компоненты: 1) новые бизнес-модели, представляющие собой цифровые (нематериальные) активы; 2) технологии промышленного Интернета вещей. При этом управление социально-экономическими системами становится, с одной стороны, гибким, мгновенным, а с другой – более сложным, поскольку происходит формирование больших массивов экономически значимых отраслевых и межотраслевых данных и их дальнейшее преобразование и использование. В этом аспекте именно цифровые модели управления способны создать омниканальное пространство, синхронизировать данные и информацию во всех цифровых и физических каналах взаимодействия для удовлетворения потребностей клиентов в любое время и в любом месте. Примером может служить компания Tesla, которая работает с претензии в режиме реального времени и запускает новые опции через обновление программного обеспечения.

В этих условиях меняются принципы управления сложными социально-экономическими системами. Данные и информация становятся формой капитала. И конкурентные преимущества получают те экономические субъекты, которые не только обладают доступом к такой информации, а имеют эффективные технологии сбора и обработки данных. При этом важнейшими принципами управления сложными социально-экономическими системами, какими являются промышленные комплексы, становятся следующие: автоматизация анализа данных для целей управления социально-экономическими процессами; получение необходимых данных в реальном времени; мгновенное реагирование на изменения и интерактивность среды; ориентация бизнес-процессов на конкретного пользователя; принятие решений «в одно касание».

В соответствии с результатами исследования Высшей школы экономики «наибольший эффект от цифровизации может быть достигнут в наукоемких секторах сферы услуг и высокотехнологичных отраслях промышленности, эффективность которых может расти опережающими темпами по сравнению с другими секторами экономики» [4].

Однако следует отметить, что цифровизация потребует не только роста инвестиций в цифровые технологии, но и кардинальной модернизации инфраструктуры почти всех секторов экономики (за исключением добывающих, где этот процесс в значительной мере уже произошел), что обеспечит высокие темпы роста вклада фактора капитала в добавленную стоимость. В ряде секторов приток высококвалифицированных кадров не сможет компенсировать высвобождение низкоквалифицированного персонала, что приведет к от-

рицательному вкладу фактора труда в темпы роста отдельных секторов экономики. Поэтому необходимо очень осторожно подходить ко всем инструментам управления промышленным комплексом, который является сложной социально-экономической системой, и помнить, что именно новые модели управления, способные оперативно реагировать и моделировать будущие вызовы и проблемы, становятся генеральным фактором успеха в веке цифровизации.

Список использованных источников

1. Маньковский, С. В. Управление сложными социально-экономическими системами в условиях неопределенности / С. В. Маньковский // Этносоциум и межнациональная культура. – 2018. – № 5 (119). – С. 16 – 23.

2. Официальный сайт Президента Российской Федерации // <http://www.kremlin.ru> (дата обращения: 17.08.2019).

3. Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации»: Распоряжение Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р. – <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 17.08.2019).

4. Что такое цифровая экономика? Тренды, компетенции, измерение: докл. к XX Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества / Г. И. Абдрахманова, К. О. Вишневский, Л. М. Гохберг и др. ; науч. ред. Л. М. Гохберг. – М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2019.

5. McKinsey The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype. June 2015. (дата обращения: 17.08.2019).

Е. Ю. Меркулова, В. В. Авдюшин

(Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия)

УПРАВЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГИОНА

Аннотация. Внутренние угрозы экономической безопасности страны проистекают от факторов, прямо или косвенно влияющих на гражданское общество: снижение качества жизни, высокий уровень преступности, межнациональные конфликты, высокий уровень дифференциации регионов по уровню социально-экономического развития. Регулирование экономического развития регионов является неотъемлемой частью государственной социально-экономической политики, ориентированной на достижение необходимых темпов экономического роста регионов.

E. Yu. Merkulova, V. V. Avdyushin
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

MANAGEMENT OF ECONOMIC SECURITY OF THE SOCIO-ECONOMIC SYSTEM OF THE REGION

Abstract. Internal threats to the country's economic security stem from factors that directly or indirectly affect civil society: a decline in the quality of life, high crime rates, ethnic conflicts, a high level of regional differentiation in terms of socio-economic development. Regulation of the economic development of the regions is an integral part of the state socio-economic policy, focused on achieving the necessary rates of economic growth in the regions.

Пространственные различия в обеспеченности ресурсами, уровне социально-экономического развития и качества жизни населения, инфраструктуре, состоянии окружающей среды и тяжести национальных и социальных конфликтов являются неотъемлемой чертой почти всех стран. Цели и задачи обеспечения экономической безопасности социально-экономической системы региона включают в себя: наиболее эффективное использование природных ресурсов, включая ресурсы, характерные только для определенного типа регионов; предотвращение загрязнения окружающей среды, обеспечение достойного уровня жизни населения.

Экономическая безопасность региональной социально-экономической системы, в свою очередь, считается необходимой основой обеспечения экономической безопасности всего государства. Одним из непосредственных путей развития региональной экономической безопасности является пропорциональное, постепенное, сбалансированное развитие регионов. Достижение данных целей, а именно баланса в развитии региональных экономик выступает одним из важнейших условий обеспечения высоких стандартов уровня и качества жизни населения государства. Важной проблемой экономической безопасности России является рост социально-экономической дифференциации населения. Явление дифференциации порождает деление населения на своеобразные части, что приводит к неравномерности в территориальном развитии, в экономических, политических, духовных структурах и негативно сказывается как на регионах, так и на стране в целом.

Среди факторов, оказывающих влияние на дифференциацию уровней социально-экономического развития регионов, можно отметить:

- экономические (наличие или отсутствие факторов производства, наличие экономического потенциала, наличие возможности самостоятельно обеспечивать собственное развитие, наличие условий для предпринимательской деятельности, хозяйственная специализация и структура региона, инвестицион-

ная привлекательность региона, уровень развития и эффективность сложившихся экономических связей и др.);

- географические (дальность региона от столицы, пространственная близость базовых объектов инфраструктуры, территориальное размещение производственной сферы и др.);

- административно-политические (геополитическое положение региона);

- природно-климатические (природные условия, особенности климата и ландшафта и др.);

- исторические и культурные (исторические особенности функционирования региона, традиции, особенности менталитета населения и др.);

- институциональные (эффективность государственного и муниципального управления, состояние и уровень развития институтов, эффективность функционирования банковской и финансовой системы, эффективность функционирования рынка товаров и услуг и др.);

- социальные (демографическая ситуация, демографический потенциал, структура населения, качество и уровень жизни населения, состояние системы образования, социальная политика, бюджетная политика и др.);

- инфраструктурные (наличие инфраструктурных объектов, уровень развития инфраструктуры в регионе, транспортная сеть и ее доступность и др.).

Рассмотрим значения ключевых индикаторов экономической безопасности России, в среднем по ЦФО и по Тамбовской области (табл. 1).

1. Индикаторы экономической безопасности в России, ЦФО и Тамбовской области за 2018 год

Показатели	РФ	ЦФО	Тамбовская область	Пороговые значения
Коэффициент депопуляции, %	-1,6	-3,0	-7,5	0
Коэффициент рождаемости (на 1000 человек населения), ‰	10,9	9,9	8,1	22
Уровень смертности (на 1000 человек населения), ‰	12,5	12,9	15,8	12,5
Продолжительность жизни населения, лет	71,87	72,91	73,9	75
Соотношение численности людей пенсионного и трудоспособного возраста	0,49	0,48	0,54	Не более 0,4

Показатели	РФ	ЦФО	Тамбовская область	Пороговые значения
Коэффициент старости населения, %	25,0	27,2	29,9	15
Миграционный прирост населения (человек на 1000 жителей), ‰	0,9	4,7	-9,7	1,1
Доля населения с доходами ниже прожиточного минимума во всем населении, %	12,9	11,1	10,2	Не более 6
Коэффициент Джини	0,411	0,373	0,375	Не более 0,3
Уровень безработицы по методологии МОТ, %	4,8	2,9	4,1	Не более 4
Уровень преступности (количество зарегистрированных преступлений на 100 тыс. человек населения)	1401	1150	1154	Не более 1000
Площадь жилья на одного чел., м ²	25,8	26,5	27,7	Не менее 25
Уровень потребляемых килокалорий в сутки	2651,5	2583,7	2228,7	Не менее 2850

Источник: составлено автором на основе данных Росстата

Основными индикаторами экономической безопасности в демографической сфере являются показатели естественного движения населения. Коэффициент рождаемости в Тамбовской области составляет 8,1 на 1000 человек населения, что ниже среднероссийских показателей и ЦФО, а также порогового значения 22 ‰. В то же время уровень смертности существенно выше (15,8 ‰), что приводит к депопуляции населения. Еще одним из факторов, ухудшающих демографию региона, является миграционный отток населения (-9,7 ‰). Таким образом, демографическая ситуация в регионе неблагоприятная. Не достаточный уровень воспроизводства населения отражается на его структуре. Так, соотношение численности людей пенсионного и трудоспособного возраста составляет 0,54, что выше допустимого соотношения 0,4, а также среднероссийских показателей. Почти каждый третий житель региона имеет возраст старше трудоспособного, одним из положительных факторов является рост ожидаемой продолжительности жизни населения до 73,9 лет, что на год лучше результата по ЦФО.

Негативное воздействие на демографическую ситуацию оказывает низкий уровень жизни населения. Доля населения с доходами ниже прожиточного минимума во всем населении Тамбовской области составляет 10,2%, что выше порогового значения 6%, хотя ниже среднероссийского уровня. Еще одним из негативных факторов является недостаточный уровень потребляемых килокалорий в сутки, при медицинской норме 2850 ккал, текущий объем составляет 2228,7 ккал. Уровень расслоения общества в регионе ниже, чем в среднем в России, но выше чем в ЦФО, аналогичная ситуация наблюдается с уровнем преступности.

Рассмотрим показатели динамики и структуры ВРП за 2016 г. по ЦФО и Тамбовской области. Объем ВРП ЦФО составил 24,14 трлн. рублей, что на 6,5% больше чем в 2015 году. Всего за период с 1998 по 2016 год объем ВРП по ЦФО вырос в 38 раз, а по Тамбовской области в 31,5 раза. На долю Тамбовской области приходится 1,3% ВРП от общего объема ЦФО. По данным Росстата ВРП Тамбовской области в 2016 г. составил 311,4 млрд. руб. (это 98,2% к уровню 2015 г.). Рассматривая динамику видно, что начиная с 2012 года прирост ВРП по Тамбовской области был более интенсивным, чем в целом по ЦФО.

Что касается структуры ВРП по Тамбовской области, то более 25,0% приходится на сельское хозяйство, охоту и лесное хозяйство; 15,0% на оптовую и розничную торговлю; 13,0% на строительство; 14,0% на обрабатывающие производства. Согласно данным рейтинга Агентства массовых коммуникаций «Регион Медиа» Тамбовская область по показателю ВРП на душу населения поднялась за последние пять лет с 59 места на 42 место. По темпам роста ВРП за период с 2012 года область занимает третью позицию (1,53 раза), отставая лишь от Тульской (1,66 раза) и Липецкой (1,6 раза) областей, что значительно выше темпов роста по ЦФО (1,38 раза) и России (1,38 раза).

Регионы ЦФО можно разделить на две группы. Первая группа регионов (Брянская, Владимирская, Ивановская, Костромская, Орловская, Рязанская, Смоленская, Тверская области) имеет более низкие результаты социально-экономического развития. Для данной группы объем ВРП на душу населения в среднем составляет 244,8 тыс. руб., что непосредственно влияет на низкий уровень среднедушевых доходов (24 000 рублей). Низкий уровень доходов снижает покупательную способность населения, так средний оборот розничной торговли на данных территориях в среднем составил 172 443 млн. руб. Причинами невысокого объема ВРП являются недостаточность инвестиций в расчете на душу населения (51 873 руб.), в результате средний оборот отгруженных товаров собственного производства в среднем на регион составил 227 млрд. руб., из них объем инновационных товаров составил 12,9 млрд. руб.

Вторую группу регионов образовали: Белгородская, Воронежская, Калужская, Курская, Липецкая, Московская, Тамбовская, Тульская и Ярославская

области. Для данной группы объем ВРП на душу населения в среднем составляет 360,7 тыс. руб., что способствует образованию среднедушевых доходов в размере 29 325 рублей. Покупательная способность населения позволила получить средний оборот розничной торговли в размере 471 млрд. руб. в расчете на один регион. Более существенным результатам ВРП способствовали инвестиции в расчете на душу населения (89 577 руб.), в результате средний оборот отгруженных товаров собственного производства в среднем на регион составил 762 млрд. руб., из них объем инновационных товаров составил 85,4 млрд. руб. Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время Тамбовская область развивается в рамках тенденции ЦФО.

Основной целью управления экономической безопасностью является совершенствование федерализма, создание условий для более эффективного и гармоничного развития регионов и обеспечения благосостояния населения РФ. Основными стратегическими задачами системы управления экономической безопасностью являются:

- сохранение единого внутреннего рынка России, единства энергетической, транспортной и коммуникационной инфраструктуры, единой денежно-кредитной системы, общего контроля экспорта и импорта продукции при наличии свободных экономических, научно-технических и иных отношений между предприятиями на всей территории России, свободной конкуренции со стороны производителей различных форм собственности, свободного перемещения товаров и капитала;
- повышение уровня благосостояния населения каждого региона, сбалансированное и постепенное выравнивание уровней жизни, устранение чрезмерных контрастов в условиях проживания;
- развитие горизонтальных отношений между регионами, создание рынка труда и контроля занятости, создание рынков капитала путем развития акционерных обществ, фондовых бирж, коммерческих банков и др.;
- преодоление политической нестабильности, межэтнической напряженности и противоречий в российском государственном устройстве и др.

Список использованных источников

1. Арбузов, С. Методологические основы оценки уровня экономической безопасности / С. Арбузов // Общество и экономика. – 2017. – № 6. – С. 28 – 37.
2. Криворотов, В. В. Экономическая безопасность государства и регионов : учебное пособие / В. В. Криворотов, А. В. Калина, Н. Д. Эриашвили. – М. : Юнити, 2018. – 56 с.
3. Крылов, А. А. Мониторинг национальной и региональной экономической безопасности в современной России: проблемы, подходы, перспективы / А. А. Крылов, Ю. В. Латов // Микроэкономика. – 2018. – № 2. – С.107 – 119.

4. Писаренко, А. О. Экономическая безопасность в России: современное состояние, угрозы и перспективы развития / А. О. Писаренко // Нац. интересы: приоритеты и безопасность. – 2018. – Т. 14, Вып. 5. – С. 927 – 940.

5. Родионова, Л. Н. Экономическая безопасность: концепция, стандарты / Л. Н. Родионова. – М. : Русайнс, 2019. – 32 с.

И. В. Петров

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

О СВОЙСТВАХ РАВНОВЕСНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ В ИГРАХ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТЕЙ

Аннотация: Проведен обзор последних достижений в теории сетевых игр (англ.«Networkformationgames»). Особое внимание уделено вопросам численного исследования таких игр: нахождению равновесия и анализа чувствительности равновесных структур к изменению стратегий агентов.

I. P. Petrov

(V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia)

ON PROPERTIES OF EQUILIBRIUM STRUCTURES IN NETWORK FORMATION GAMES

Abstract: This article presents an overview of the latest advancement in the network formation games theory. Particular attention is devoted to the numerical research of such games: finding equilibrium and sensitivity analysis of equilibrium structures with respect to changes in agents' strategies.

Структура социального взаимодействия может быть описана в виде социальной сети. Знание законов формирования таких структур позволяет ответить на вопросы о том,

- насколько наблюдаемая структура эффективна (например, с точки зрения общественного благосостояния)?
- является ли наблюдаемая структура равновесной?
- каковы предельные характеристики равновесных сетей?
- какова специфика протекания различных процессов (распространение информации, эпидемий) для наблюдаемых структур (критические показатели, скорость распространения и др.)?

подавляющее большинство механизмов формирования сетей основаны на взаимодействиях отдельных пар вершин. Вероятно, классическими можно назвать механизмы, отраженные в работах [1 – 3]. Существует ряд свежих работ о моделях, связанных с процессами распространения информации: в [4] рассмотрена модель формирования сети, функция выигрыша агента в которой является компро-

миссом между выгодой от взаимодействия и затратами от потери приватности; в случае, когда представления участников о стратегиях остальных ограничены лишь ближайшими соседями, в [5] вводится понятие равновесия, согласованного с сетью, а в [6] из аналогичных предпосылок предлагается модель формирования сетевой структуры, в которой у вершины, в противовес «публичным» связям, также имеются и «скрытые», наблюдаемые только ближайшими соседями.

Недавние работы [7 – 9] продемонстрировали существенную роль не только парного взаимодействия, но и взаимодействия групп вершин (сообществ, кластеров). Так например, рост ассортативности может повлечь за собой снижение скорости распространения информации, так как большая часть коммуникаций будет происходить не между кластерами, а внутри них [7]; в модели [8] снижение затрат на коммуникацию приводит к более связанной, но и более кластеризованной структуре.

Концепция равновесия Нэша имеет первостепенное значение в теории игр. В играх формирования сетей вводятся понятия стабильности, базирующиеся на данной концепции или ослабляющие свойственные ей ограничения. Наибольшее распространение получили понятия стабильности по Нэшу, попарной, гибридной и сильной стабильности [10].

В работе [11] показано, что нахождение равновесия Нэша в игре является вычислительно неразрешимой задачей. В связи с этим исследователи рассматривают отдельные классы игр, в которых либо равновесие Нэша, либо его ослабленные версии могут быть представлены в аналитической форме [12, 13] либо получены численными методами [14]; предъявляются алгоритмы и их реализации [14, 15].

В работах [16, 17] предложены методы анализа чувствительности решения игры на сетях; в [18, 19, 20] для широкого класса функций выигрыша авторы рассмотрели некоторые свойства равновесных сетевых структур, возникающих в результате решения игры.

Вышеперечисленные работы демонстрируют различные подходы к анализу равновесных конфигураций; их исследование и синтез может позволить перейти к новым постановкам задач управления. Вопросы влияния институциональных, мотивационных и информационных ограничений на множество допустимых сетей, тесно связанные с задачей управления формированием сетевых структур, представляют особый интерес для дальнейших исследований.

Список использованных источников

1. Ballester, C., Calvó-Armengol, A., Zenou, Y. (2006). Who's who in networks: wanted the key player. *Econometrica* 74:5, 1403 – 1417.
2. Jackson M.O., Wolinsky A. 1996. A Strategic Model of Social and Economic Networks // *J. Econom. Theory*. N 71. P 44 – 74.
3. Talman, D., & Yang, Z. (2011). A model of partnership formation. *Journal of Mathematical Economics*, 47, 206 – 212.

4. Acemoglu, D., Makhdoumi, A., Malekian, A., Ozdaglar, A. (2017). Privacy-constrained network formation, *Games and Economic Behavior*, Volume 105, Pages 255-275, doi:10.1016/j.geb.2017.08.001.
5. Lipnowski, E. and Sadler, E. (2019). Peer-Confirming Equilibrium. *Econometrica*, 87: 567-591. doi:10.3982/ECTA15597
6. Foerster, M., Ana, M. and Vannetelbosch, V. (2018). Shadow links. doi:10.13140/RG.2.2.14444.21123.
7. Golub, B., Jackson, M.O., (2012). How homophily affects diffusion and learning in networks. *Quart. J. Econ.* 127, 1287 – 1338.
8. Iijima, R. and Kamada, Y. (2017). Social distance and network structures. *Theoretical Economics*, 12: 655 – 689.
9. Goyal S, “Connections. An Introduction to the Economics of Networks”, Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2007.
10. Губко, М. В. Управление организационными системами с сетевым взаимодействием агентов. Часть 1. Обзор теории сетевых игр / М. В. Губко // *Автоматика и телемеханика*. – № 8. – 2004. – С. 115 – 132.
11. ConstantinosDaskalakis, Paul W. Goldberg, and Christos H. Papadimitriou (2006). The Complexity of Computing a Nash Equilibrium. In the 38th Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC).
12. Kukushkin, N.S. (2007). Congestion games revisited. *International Journal of Game Theory* 36, 57 – 83.
13. Kearns, M. (2007). Graphical games. In N. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos and V. Vazirani (Eds.), *Algorithmic game theory*, chapter 7, 159–180. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
14. ConstantinosDaskalakis and Christos H. Papadimitriou (2015). Approximate Nash equilibria in anonymous games. *J. Economic Theory*, 156:207 – 245.
15. AkiyoshiShioura (2017). On the partnership formation problem. *Journal of Mechanism and Institution Design* Volume 2, issue, 105 – 140.
16. Parise, F., Ozdaglar, A. (2017). Sensitivity analysis for network aggregative games, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*.
17. F. Parise and A. Ozdaglar (2017). A variational inequality framework for network games: Existence, uniqueness, convergence and sensitivity analysis. Working paper, arXiv preprint arXiv:1712.08277
18. Hiller, T. (2017). Peer effects in endogenous networks, *Games and Economic Behavior*, Volume 105, Pages 349-367, ISSN 0899-8256, doi:10.1016/j.geb.2017.07.010.
19. Baetz, O. (2015). Social activity and network formation. *Theoretical Economics*, 10: 315-340. doi:10.3982/TE1487
20. Bigi, G., Castellani, M., Pappalardo, M., Passacantando, M. (2013). Existence and solution methods for equilibria. *Eur. J. Oper. Res.* 227, 1–11.

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

П. В. Балабанов, А. С. Егоров, А. Г. Дивин,

А. А. Жиркова, С. В. Мищенко

(Тамбовский государственный технический университет,

Тамбов, Россия)

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Аннотация. Рассматривается гиперспектральный метод контроля применительно к пищевым продуктам, в частности, овощам, фруктам, масло-жировой продукции. Приведены его достоинства и недостатки, описываются характеристики метода и конкретная реализация с применением гиперспектральной камеры SpecimFx-10. Представлены результаты спектральных характеристик для яблок, картофеля и других продуктов.

P. V. Balabanov, A. S. Egorov, A. G. Divin,

A. A. Zhirkova, S. V. Mishchenko

(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

HYPERSPECTRAL MONITORING OF FOOD PRODUCTS

Abstract. This article discusses the hyperspectral control method applied to food products, in particular vegetables, fruits, oil and fat products. Its advantages and disadvantages are given, the characteristics of the method and the specific implementation using the hyperspectral camera Specim Fx-10 are described. The results of spectral characteristics for apples, potatoes and other products are presented.

Качество продуктов питания тесно связано со здоровьем человека. Многие заболевания растений на ранних стадиях (инкубационный период) незаметны и их сложно обнаружить без специального оборудования. Но жизнь и наука не стоят на месте. Сейчас создано большое количество методов, позволяющих определить (различить) болезнь на самых ранних стадиях, а также точно диагностировать ее. Это способствует сохранению урожая и, что самое главное, здоровья.

Одним из методов анализа и контроля является спектроскопия. Видов спектроскопии много, но именно в пищевой промышленности целесообразнее

использовать гиперспектральный контроль, главное преимущество которого состоит в сохранении плодов целыми при получении исчерпывающей информации о свойствах вещества. Также методику исследований можно легко и просто автоматизировать или изменить. Метод является достаточно простым в использовании, быстрым и эффективным (регистрируются минимальные изменения в состоянии плодов).

Недостатком метода является тот факт, что данные системы работают в узком интервале длин волн и некоторые заболевания в этом диапазоне просто не видны.

Спектральный анализ – совокупность методов качественного и количественного определения состава вещества. Основан на исследовании спектров испускания, поглощения, люминесценции и отражения [1].

Для контроля качества пищевых продуктов, в частности, овощей и фруктов, интерес представляют:

- ультрафиолетовая область (до 400 нм);
- видимая область (400...700 нм);
- инфракрасная область (более 700 нм).

По инфракрасным спектрам поглощения возможно определить строение неорганических и органических веществ с короткими молекулами, например, ферментов, антибиотиков и др.

По числу и положению пиков в спектрах поглощения можно судить о природе вещества (качественный анализ), а по интенсивности полос поглощения – о количестве вещества (количественный анализ) [2, с. 57].

Гиперспектральный контроль основан на анализе спектра, на способности объектов избирательно отражать и поглощать свет разной длины волны. Данный метод является самым информативным среди неразрушающих методов контроля. Важная особенность – отсутствие усреднения по длине волны, т.е. использование дифференциальных характеристик и всего спектра регистрируемых длин волн.

Метод основан на сравнении концентрации хлорофилла в растительных тканях здоровых плодов и поврежденных или больных.

Гиперспектральный анализ проводится для числа каналов от сотен до тысяч с помощью специального прибора.

Хлорофилл поглощает свет в двух характерных спектральных пиках: 665 нм и 465 нм [3].

Жизнедеятельность растений тесно связана с протекающими процессами в хлоропластах. Эти процессы влияют на форму кривой спектрального отражения. На основе этого можно регистрировать четкие различия отражательной способности растительного объекта, которые зависят от его фактического состояния в видимой, ближней инфракрасной и средней инфракрасной частях спектра. Отличия форм спектральных кривых способствуют разработке различ-

ных спектральных признаков для оценки состояния растений и, в частности, плодов.

Гиперспектрометры регистрируют почти непрерывную зависимость отраженного излучения от длины волны, в виде совокупности относительно узких смежных спектральных каналов, покрывающую весь регистрируемый сенсором спектральный диапазон. Они фиксируют от десятков до сотен спектральных снимков для каждой точки кадра, получая таким образом единый спектральный профиль.

Принципиальные отличия гиперспектральной камеры от других приборов – характер спектральной кривой, отображающей зависимость спектральной яркости объекта от длины волны, которая для обычных широкополосных сканеров оказывается обобщенной, загрубленной в сравнении с кривой, получаемой с помощью гиперспектрометра, что в результате приводит к потере значительной части информации о спектральных отражательных свойствах поверхности.

На кафедре ФГБОУ ВО «ТГТУ» «Мехатроника и технологические измерения» была разработана установка, позволяющая сканировать поверхность плодов, получать информацию о спектре отражения и определять по нему качество объекта [4].

Установка состоит из гиперспектральной камеры Specim FX 10 / FX 10 e, разработанной компанией Specim [13] и платформы. Камера собирает гиперспектральные данные в пределах от 400 до 1000 нм.

На рисунках 1 – 4 представлены графики спектральных характеристик, извлеченные из гиперспектральных изображений.

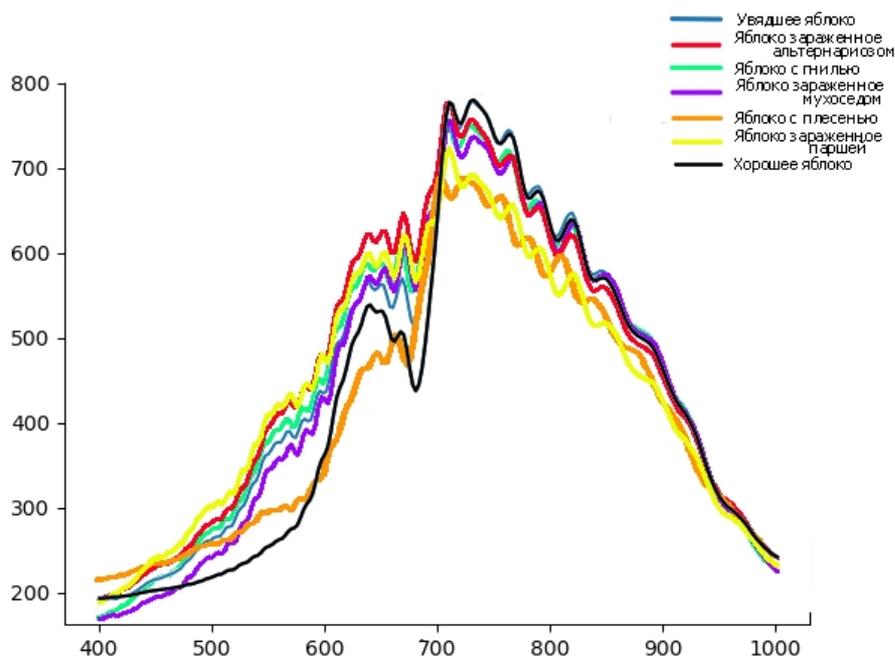


Рис. 1. Графики спектральных характеристик яблок

Из первого графика видно, что в диапазоне от 400...600 нм и около 700 нм наблюдаются отличия: хорошее, не поврежденное, без болезней яблоко имеет более плавную линию на промежутке 400...600 нм и резкий скачок на 690 нм.

На втором графике различия наблюдаются в диапазоне 300...400 нм, на третьем графике в диапазоне 900...1200 нм (рис. 2, 3).

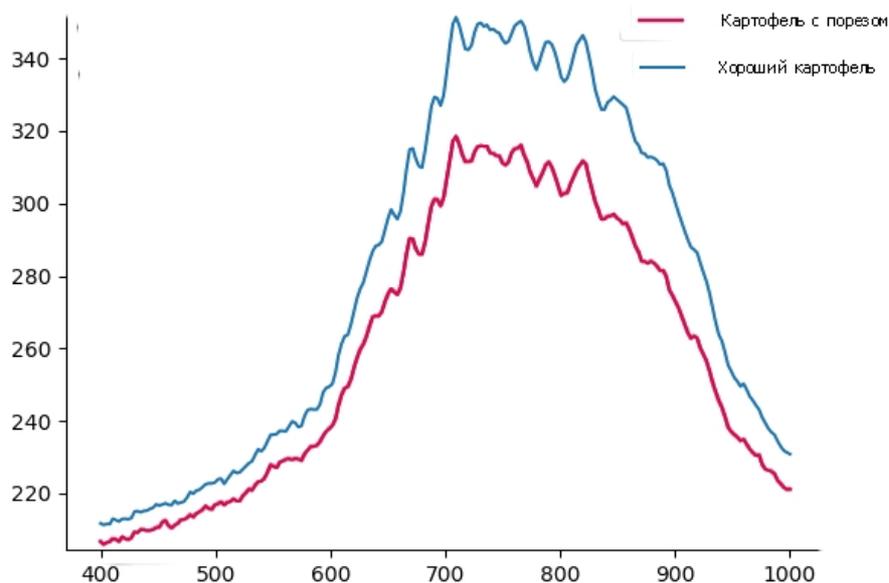


Рис. 2. Графики спектральных характеристик плодов картофеля

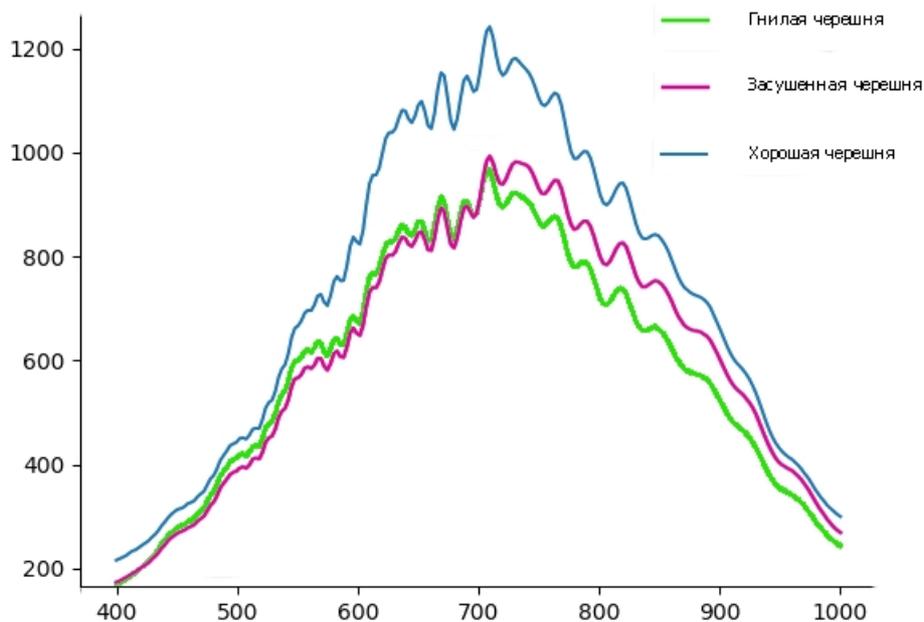


Рис. 3. Графики спектральных характеристик плодов черешни

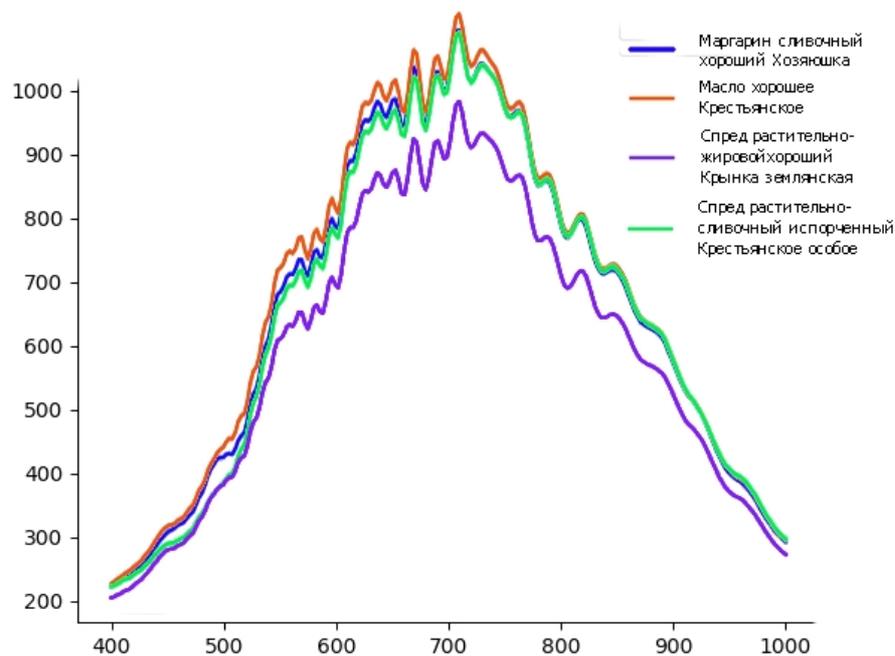


Рис. 4. Графики спектральных характеристик маргарина и масла

Из четвертого графика следует, что различия между настоящим сливочным маслом и спредом (маргарином) с помощью гиперспектральной камеры в диапазоне от 400 до 1000 нм нельзя определить.

Вывод: гиперспектральный контроль плодоовощных культур позволяет отличить больное растение или плод от здорового, легко выявить новообразования на поверхности исследуемого объекта, получить информацию о химических изменениях структуры растительности (из-за влияния внешних условий).

Изучение и оценка спектральных характеристик исследуемых объектов позволяют находить скрытые аномальные изменения, которые нельзя заметить без применения специальных приборов и методик.

Также на основании получаемых с помощью гиперспектральной камеры материалов можно определять различные типы биохимических изменений, происходящих с растениями. Возможна регистрация изменений состояния растений на ранних стадиях повреждения, когда еще не видно явных повреждений и изменений.

Список использованных источников

1. Спектральный анализ. Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Спектральный_анализ (дата обращения: 9 августа 2019).
2. Бусев, А. И. Определения, понятия, термины в химии : пособие для учащихся / А. И. Бусев, И. П. Ефимов. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 1981. – 192 с.
3. Гиперспектральные сенсоры компании IMES. Решения для высококачественного спектрального анализа [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://>

www.npk-photonica.ru/images/giperspektralnye-sensory-kompanii-imec-pdf163406.pdf (дата обращения: 9 августа 2019).

4. Разработка системы управления перемещением объекта контроля при гиперспектральном анализе / П. В. Балабанов, А. А. Жиркова, А. Г. Дивин, С. В. Мищенко, Н. А. Рамон // Инженерные технологии для устойчивого развития и интеграции образования, науки и производства : Международная научно-практическая конференция имени В. И. Вернадского. – 29 – 31 мая 2019 года. – Тамбов, 2019.

5. Метод формирования спектральных изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ozlib.com/871871/tehnika/metod_formirovaniya_spektralnyh_izobrazheniy (дата обращения: 9 августа 2019).

6. Демонстрация возможности изучения процессов горения и взрыва с помощью дистанционного гиперспектрального зондирования. Физико-химическая кинетика в газовой динамике / А. П. Калинин, А. Г. Орлов, А. И. Родионов, К. Я. Трошин. – М., 2009. – С. 12.

7. Гиперспектральные технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://con-fig.com/files/pdf/program_2013/ковров.pdf (дата обращения: 9 августа 2019).

8. Использование наземных и воздушных методов спектрометрических наблюдений для определения состояния сельскохозяйственных культур / О. В. Тутабалина, М. В. Зимин, Е. И. Голубева, И. М. Микляева, О. В. Вахнина, А. И. Михеева // Вопросы географии. – 2017. – № 144. – С. 391.

9. Личман, Г. И. Системы технического зрения, используемые в точном земледелии Ч. 1. / Г. И. Личман, И. Г. Смирнов, А. И. Беленков // Фермер, Поволжье. – 2017. – № 5 (58). – С. 40.

10. Личман, Г. И. Системы технического зрения, используемые в точном земледелии Ч. 2. / Г. И. Личман, И. Г. Смирнов, А. И. Беленков // Фермер, Черноземье. – 2017. – № 2 (2). – С. 25.

11. Гиперспектральные исследования поражения сельскохозяйственных культур фитопатогенами / Э. Я. Исмаилов, В. Д. Надыкта, В. Я. Исмаилов, И. А. Костенко, А. А. Швец // Космонавтика и ракетостроение. – 2012. – № 3 (68). – С. 103.

12. Захаров, Е. П. Экспериментальные исследования спектральной плотности энергетической освещенности и отражательных характеристик различных типов растительности / Е. П. Захаров, А. А. Ризванов, В. А. Третьяков // Космонавтика и ракетостроение. – 2013. – № 2 (71). – С. 147.

13. Технологии гиперспектральных камер [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://naked-science.ru/article/concept/tehnologii-giperspektralnyh-kamer> (дата обращения: 9 августа 2019).

П. В. Балабанов, А. Г. Дивин, А. С. Егоров, Д-Ю. Нсено-пемби
(Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия)

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОВОЩЕЙ И ФРУКТОВ

Аннотация. Разработана система технического зрения для контроля качества овощей и фруктов. В основе разработки использована оптическая система, позволяющая исследовать объект контроля в диапазоне длин волн от 400 до 10 000 нм. Комплексное применение гиперспектрального и теплового методов контроля позволяет обнаруживать фрукты и овощи, пораженные фитозаболеваниями.

P. V. Balabanov, A. G. Divin, A. S. Egorov, D-U. Nseno-pemby
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

VISION SYSTEM FOR QUALITY CONTROL OF VEGETABLES AND FRUITS

Abstract. The system of technical vision for quality control of vegetables and fruits is developed. The development is based on an optical system that allows to study the object of control in the wavelength range from 400 to 10,000 nm. Complex application of hyperspectral and thermal control methods allows to detect fruits and vegetables affected by phyto-diseases.

Здоровье и продолжительность жизни человека во многом зависят от качества потребляемых продуктов питания. Поэтому поставка потребителю качественных и безопасных овощей и фруктов является важной задачей. Одним из путей ее решения является сортировка овощей и фруктов перед их закладкой на хранение или перед отправкой потребителю. Сортировка предполагает выбраковку из исходной массы инородных тел, а также образцов, имеющих несоответствующие размеры и повреждения, полученные вследствие механических воздействий или фитозаболеваний.

В данной работе поставлена цель разработки системы технического зрения для контроля качества овощей и фруктов. В основе разработки использована оптическая система, позволяющая исследовать объект контроля в диапазоне длин волн от 400...10000 нм. Для выявления дефектов применяются тепловой и гиперспектральный методы контроля [1 – 6].

Тепловой метод основан на различии теплофизических свойств здоровых и поврежденных растительных тканей, что приводит к отличию их температур в процессе нагрева или охлаждения. Поэтому в процессе теплового контроля оказывают кратковременное тепловое воздействие на объекты и анализируют нестационарные температурные поля на их поверхностях.

Гиперспектральный метод заключается в получении на разных длинах волн массива изображений объекта и дальнейшем исследовании его спектральных особенностей. Это позволяет исследовать качественные характеристики объектов, в частности обнаруживать скрытые нарушения их структуры. Сбор информации осуществляется из различных участков электромагнитного спектра. Однозначно определить материалы возможно при помощи уникальной спектральной характеристики излучения.

Разработанная система технического зрения включает подсистему теплового и гиперспектрального контроля.

Подсистема теплового контроля качества овощей и фруктов. Подсистема теплового контроля включает два инфракрасных нагревателя мощностью 1,5 кВт и тепловизионную камеру. В качестве камеры используется тепловизор Flir серии Ax5, обладающий тепловой чувствительностью 0,05 °С при температуре 30 °С и погрешностью измерений температуры ± 5 °С. Это позволяет получать высококонтрастные изображения. Изображения (рис. 1) с камеры по интерфейсу Ethernet передаются в персональный компьютер, где обрабатываются согласно описанному далее алгоритму, реализованному в среде LabVIEW с использованием библиотеки NIVision.

К полученному изображению применяли операцию порогового представления яркости. Благодаря этому удавалось найти контролируемый объект (клубень) на изображении и выделить его контур.

Для определения дефекта на поверхности клубня, который на ИК-изображении выглядел как светлая область, потребовалось проводить дополнительную коррекцию контрастности и яркости изображения клубня. Для этого осуществляли преобразование динамической интенсивности света в областях малой контрастности (т.е. в области, ограниченной контуром клубня).

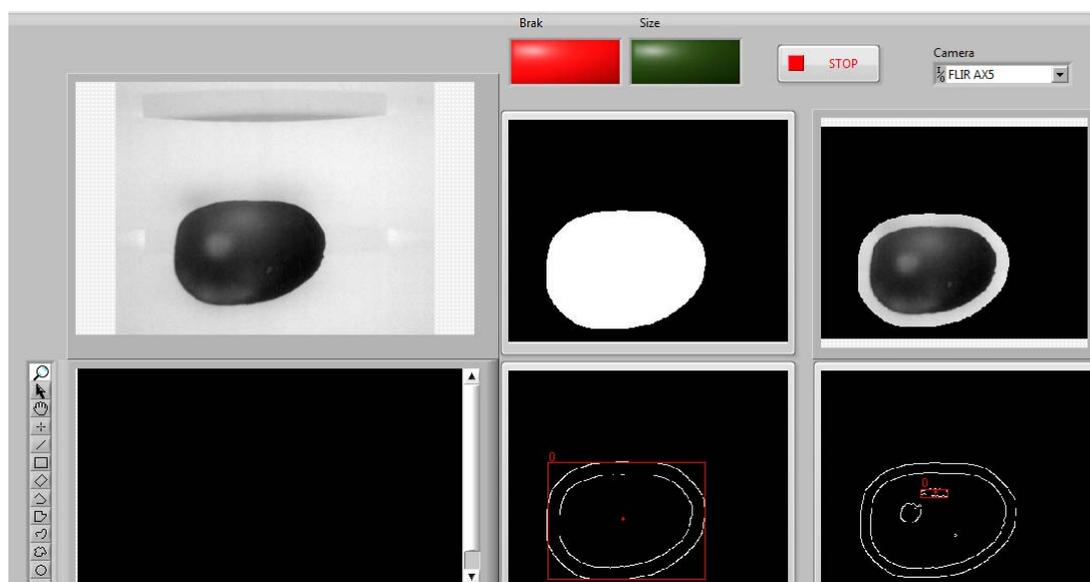


Рис. 1. Лицевая панель программы для обнаружения дефектных клубней

При этом использовали логарифмическую коррекцию градации тонов, что позволило расширить диапазон малых значений уровня яркости и сузить диапазон больших значений уровня яркости. При использовании серой палитры эти преобразования увеличили контрастность затемненных областей за счет контрастности светлых участков. Это позволило применить операцию порогового представления яркости для изображения клубня. При этом все пиксели, лежащие в пределах заданного интервалом представления яркости, задали равными 1, значения всех остальных пикселей задали равным 0. Таким образом, используя метрический метод среды NIVision, разбили изображение на частицы, содержащие объект контроля (дефект) и фоновые области. Полученное изображение является бинарным, что упрощает дальнейшее применение нелинейных фильтров Превитта и Собела для выделения контуров дефекта.

Подсистема гиперспектрального контроля качества овощей и фруктов. Подсистема гиперспектрального контроля состоит из гиперспектральной камеры и подсветки. Мы использовали гиперспектральный анализ в видимом и ближнем ИК-диапазонах электромагнитного спектра. Для этого применяли камеру SpecimFX-10. Спектральный диапазон камеры составляет от 400 до 1000 нм, а разрешение около 3 нм, скорость видеопотока до 330 fps (кадров в секунду). Неохлаждаемые сенсоры, изготовленные по КМОП технологии размещены на матрице 16×16 мкм, что представляет собой эффективный размер пикселя фотоприемника и образуют линейку из 1024 пикселей. Для получения отраженного потока света применены размещенные с двух сторон объекта галогеновые лампы 2 типа R7SNavigator мощностью 150 Вт и цветовой температурой 2900 К. Камера была расположена на высоте 150 мм от поверхности объекта. Угол зрения камеры составляет 40°. Характеристики камеры позволяют получать для 1 мм объекта контроля 9 спектрограмм.

В качестве примера на рис. 2 показаны полученные спектрограммы для отдельных точек на поверхности яблока.

Полученные данные показали, что для здоровой ткани яблока характерно поглощение света в диапазоне длин волны 650...690 нм (линии Good на рис. 2),

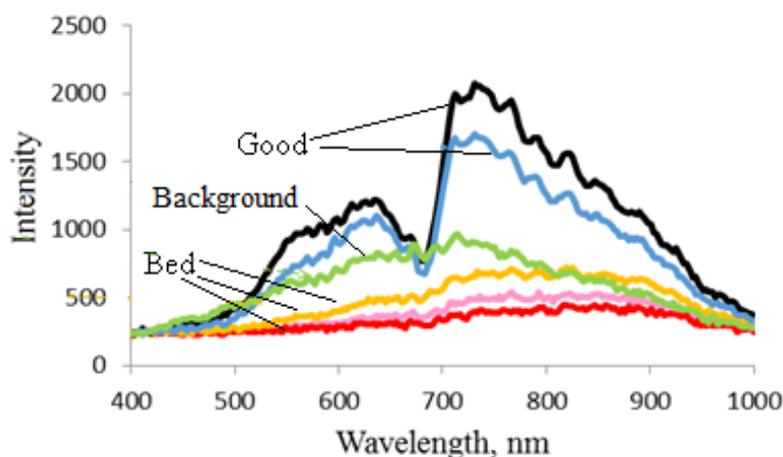


Рис. 2. Спектры отражения растительной ткани яблока сорта Лигол

что хорошо согласуется с известными данными, и объясняется поглощением красного излучения хлорофиллом, содержащимся в растительных тканях яблока. Для точек, расположенных на поврежденной гнилью ткани яблока (линии Bed), характерно отсутствие поглощения в указанном диапазоне, что объясняется разрушением хлорофилла, вызванным фитозаболеванием.

Выводы. Результатом работы является разработанная система технического зрения для контроля качества овощей и фруктов. В основе системы использованы оптические методы контроля в диапазоне 400...10000 нм. Причем в диапазоне 400..1000 нм интенсивность отражения от поврежденных растительных тканей ниже, чем у здоровых для всех длин волн. При этом в спектре отражения поврежденных растительных тканей отсутствуют, или гораздо менее выражены полосы поглощения хлорофилла. Эти закономерности позволяют создать несложный алгоритм обработки гиперспектральных изображений, предназначенный для обнаружения поверхностных дефектов овощей и фруктов оптическими системами контроля. Подповерхностные дефекты, залегающие на глубине до 3 мм, видны в ИК-диапазоне 1500...10000 нм. Это позволило создать надежный алгоритм обнаружения дефектов объектов по их ИК-изображениям.

Полученные данные показали, что комплексное применение гиперспектрального и теплового методов контроля позволяет успешно обнаруживать объекты растительного происхождения, пораженные фитозаболеваниями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание. Проект 8.13393.2019/13.1 «Роботизированная система мониторинга и диагностики фитозаболеваний плодовоовощных культур»).

Список используемых источников

1. Q. Chen, Ch. Zhang, J. Zhao, Q. Ouyang, "Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety" Trends in Analytical Chemistry. vol. 52, pp. 261-274.
2. K. Chao, C. Yang, Y. Chen, M. Kim, D. Chan, "Hyperspectral-multispectral linescan imaging system for automated poultry carcass inspection applications for food safety", Poultry Sci. vol. 86, pp. 2450-2460, 2007.
3. C.J. Du, D.W. Sun, "Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation", Trends Food Sci. Technol., vol. 15, pp. 230-249, 2004.
4. G. Ginesu, D. D. Giusto, V. Margner, P. Meinlschmidt, "Detection of foreign bodies in food by thermal image processing", IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 51, pp. 480-490, 2004.
5. P. Mehl, K. Chao, M. Kim, Y. Chen, "Detection of defects on selected apple cultivars using hyperspectral and multispectral image analysis", Appl. Eng. Agric. vol. 18, pp. 219-226, 2002.

6. J. R. Mathiassen, E. Misimi, M. Bondo, E. Veliyulin, S.O. Ostvik, "Trends in application of imaging technologies to inspection of fish and fish products", Trends Food Sci. Technol. vol. 22, pp. 257-275, 2011.

7. Балабанов, П. В. Повышение эффективности теплового контроля качества растительной сельскохозяйственной продукции. Приборы / П. В. Балабанов, М. Г. Муравьева. – 2017. – № 7. – С. 19 – 24.

Д. А. Баранов, М. А. Сурков, Г. А. Лахно

(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), Тамбов, Россия)

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ РАДИОРАЗВЕДКИ, РЭБ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПУНКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. Рассматривается повышение эффективности боевого применения средств радиоразведки, РЭБ и автоматизированных пунктов управления, путем создания и эксплуатации информационно-справочной базы данных о радиосигналах «Сигнал 2.0».

D. A. Baranov, M. A. Surkov, G. A. Lakhno

(Interspecies Center for Training and Combat use of Electronic Warfare Troops (Training and Testing), Tambov, Russia)

INFORMATIONAL AND ANALYTICAL SYSTEM FOR TRAINING RADIO-ELECTRONIC SPECIALISTS, RADIO-ELECTRONIC TROOPS AND AUTOMISED CONTROL CENTERS

Abstract. This article deals with improving of warfare usage efficiency of radio-electronic warfare troops and automised control centers due to creation and usage of radio signal database «Сигнал 2.0».

Постоянно возрастающая роль информационных технологий в современном мире объективно определяет актуальность поиска новых подходов, позволяющих повысить эффективность боевого применения средств радиоразведки, РЭБ и автоматизированного управления.

В связи с многообразием встречающихся сигналов, для решения задач радио- и радиотехнической разведки требуется предварительное накопление информации о радиосигналах.

Современные средства радиоразведки не позволяют в полной мере представить основные характеристики радиосигналов, используемых в войсках радиоэлектронной борьбы. Создание специального программного обеспечения

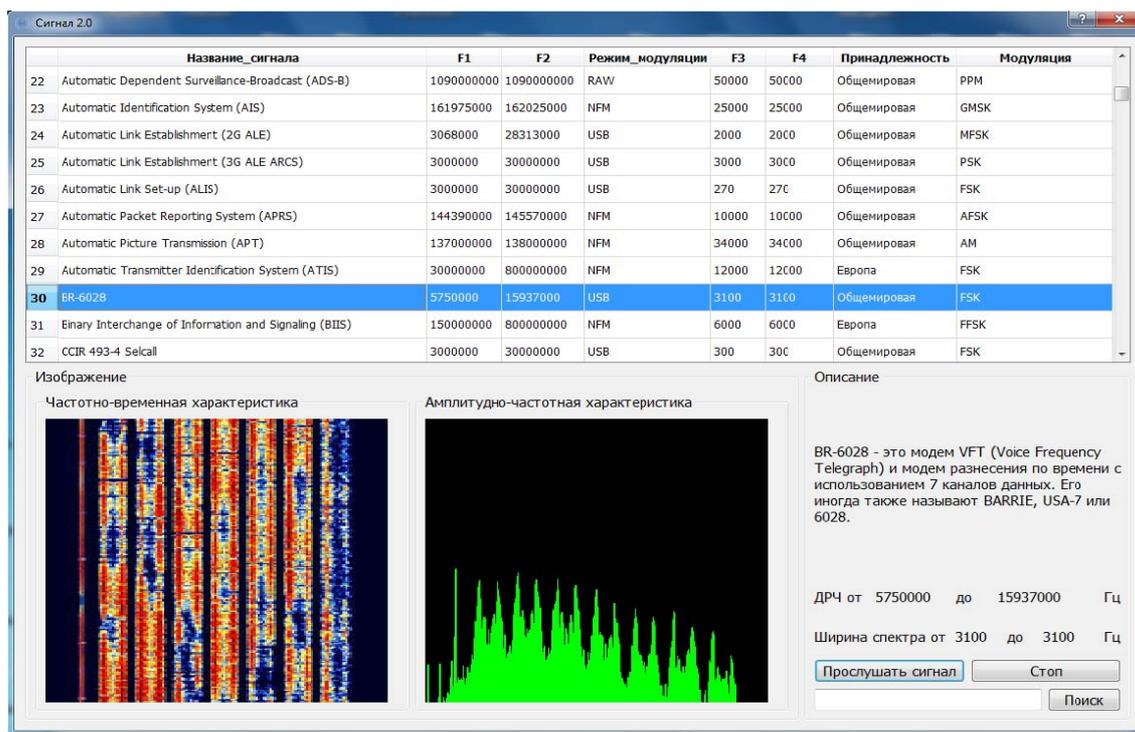


Рис. 1. Интерфейс информационно-справочной базы данных о радиосигналах «Сигнал 2.0»

широко используется во многих узкоспециализированных сферах Вооруженных Сил Российской Федерации. В связи с этим, для повышения эффективности боевого применения средств радиоразведки, РЭБ и автоматизированного управления в процессе обработки радиосигналов, была разработана информационно-справочная база данных о радиосигналах «Сигнал 2.0» (рис. 1). Она необходима для оперативного представления справочной информации о радиосигналах, используемых для радиосвязи и передачи данных, и их характеристиках.

Информационно-справочная база данных «Сигнал 2.0» является кросс-платформенной, т.е. она способна работать с различными операционными системами.

Основными возможностями являются:

- представления основных характеристик сигналов (диапазон, ширина спектра, вид модуляции, государственная принадлежность);
- визуальное отображение частотно временной и амплитудно-частотной характеристик сигналов;
- звуковое воспроизведение сигналов;
- поиск сигналов по различным фильтрам;
- добавление новых сигналов;
- автоматическое сравнение сигнала из базы данных с разведанным сигналом.

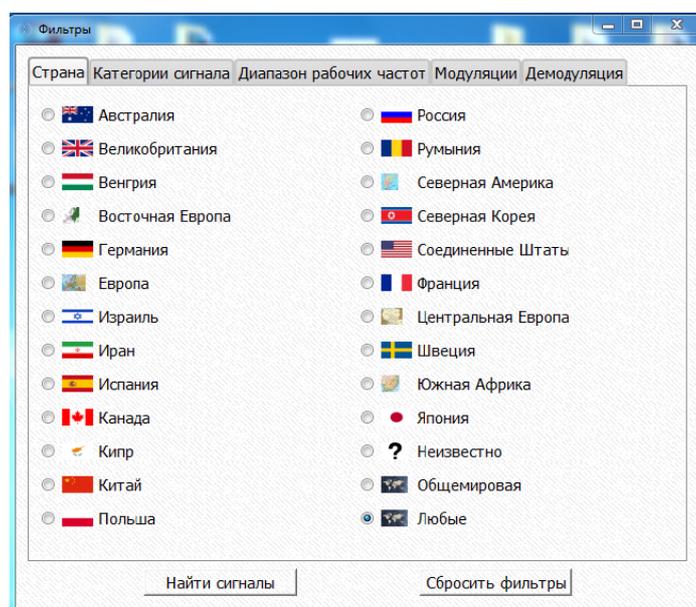


Рис. 2. Фильтр «Страна»

В информационно-справочной базе данных «Сигнал 2.0» реализовано 5 фильтров, которые служат для узконаправленного поиска сигналов и их дальнейшего анализа. К ним относятся:

1. Страна.

В данном фильтре можно выбрать определенную территорию, на которой необходимо произвести поиск сигналов, также предусмотрена возможность общемирового анализа сигналов (рис. 2).

2. Категория сигналов.

На данный момент информационно-справочная база данных «Сигнал 2.0» содержит 18 различных вариантов сигнала. Все они представлены на рис. 3.

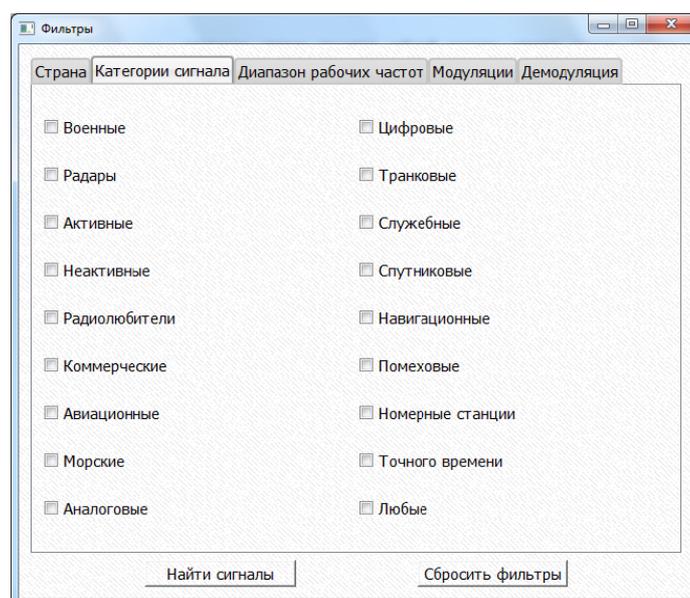


Рис. 3. Фильтр «Категория сигнала»

3. Диапазон рабочих частот.

При необходимости можно произвести поиск радиосигналов на диапазоне, ограниченном верхней и нижней частотами. Данный фильтр позволяет выбрать один из пяти возможных диапазонов, либо же произвести поиск по всем диапазонам (рис. 4).

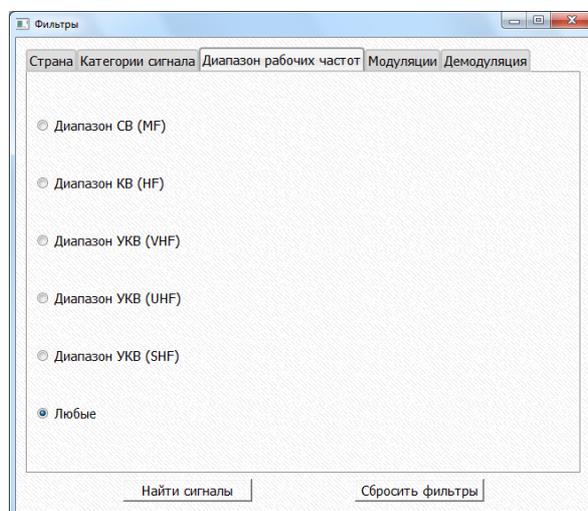


Рис. 4. Фильтр «Диапазон рабочих частот»

4. Модуляция.

Передаваемая информация заложена в модулирующем сигнале, а роль переносчика информации выполняет высокочастотное колебание, называемое несущим (модулируемым). Модуляция, таким образом, представляет собой процесс «посадки» информационного колебания на заведомо известную несущую с целью получения нового модулированного сигнала.

В качестве несущего могут быть использованы колебания различной формы (прямоугольные, треугольные и т.д.), однако чаще всего применяются гармонические колебания. В зависимости от того, какой из параметров несущего колебания изменяется, различают вид модуляции (амплитудная, частотная, фазовая и др.). В информационно-справочной базе данных представлено 25 видов модуляции (рис. 5).

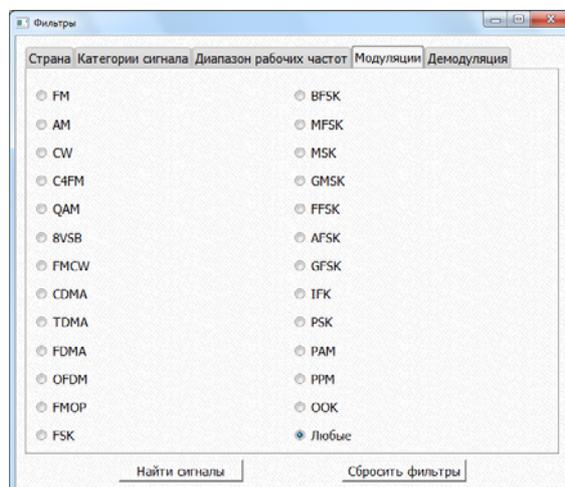


Рис. 5. Фильтр «Модуляция»

5. Демодуляция.

При передаче аналоговых сигналов (звук, видео) колебания напряжения или тока низкой частоты используются для модуляции (слабого изменения амплитуды, частоты или фазы) высокочастотных колебаний. На принимающей станции из этих сложных колебаний с помощью специальных методов снова выделяют колебания низкой частоты, которые после усиления подаются на громкоговоритель (в случае передачи звуковых сигналов) или экран (в случае передачи видеосигналов). Этот процесс выделения информации из принятых модулированных колебаний получил название демодуляции, или детектирования колебаний. Фильтр «Демодуляция» разделен на 5 основных типов демодуляции и 8 специфических (рис. 6).

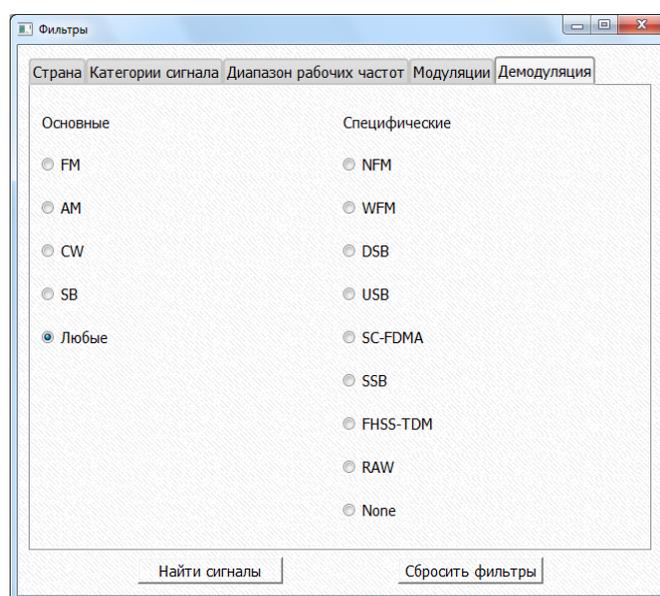


Рис. 6. Фильтр «Демодуляция»

В качестве среды для разработки программы используется Qt. Qt – кросс-платформенная среда разработки программного обеспечения на языке программирования C++.

Системой управления базой данных (СУБД) выбрана SQLite, так как является встраиваемой и может поставляться как составная часть некоторого программного продукта, не требуя процедуры самостоятельной установки. Встраиваемая система управления базами данных предназначена для локального хранения данных своего приложения и не рассчитана на коллективное использование в сети. Физически встраиваемая СУБД чаще всего реализована в виде подключаемой библиотеки.

Таким образом, использование информационно-справочной базы данных «Сигнал 2.0» позволяет повысить эффективность боевого применения средств радиоразведки, РЭБ и автоматизированного управления.

Список использованной литературы

1. ГОСТ 24375–80. Радиосвязь. Термины и определения.
2. Кубанов, В. П. Влияние окружающей среды на распространение радиоволн / В. П. Кубанов. – Самара : ПГУТИ, 2013. – 92 с.
3. МСЭ-R Справочник. Данные о распространении радиоволн для проектирования наземных линий связи пункта с пунктом. – 2008. – 100 с.

А. С. Голуб, Н. С. Ильичев

(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), Тамбов, Россия)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ СТАНДАРТА DMR

Аннотация. Описывается алгоритм обнаружения сигналов открытого стандарта цифровой подвижной радиосвязи DMR (Digital Mobile Radio). Особое внимание уделяется рассмотрению взаимодействия программного модуля, реализующего алгоритм обнаружения с приемным устройством USRPB210.

A. S. Golub, N. S. Pichev

(Center of Training and Combat Use of Electronic Warfare Troops,
Tambov, Russia)

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR CONTROL DEVICE OF DMR STANDARD SIGNAL DETECTION

Abstract. This article describes the signal detection algorithm of the open standard digital mobile radio (DMR). Particular attention is paid to considering the interaction of a software module that implements the detection algorithm with a USRP receiver.

Основными задачами современных радиотехнических систем контроля радиоэлектронной обстановки являются обнаружение и классификация сигналов средств передачи информации, функционирующих в заданном частотно-временном интервале. В качестве объекта для обнаружения был выбран один из наиболее используемых стандартов цифровой радиосвязи – стандарт DMR.

Наличие априорных сведений о параметрах сигналов дает возможность использования согласованных способов приема. Оптимальный прием обладает рядом достоинств: более высокая вероятность правильного различения при заданной вероятности ложной тревоги по сравнению со схемами некогерентных обнаружителей; способность определять сигнал в условиях сложной сигнально-

помеховой обстановки и др. [1]. Кроме перечисленных преимуществ, согласованный прием стандартизированных цифровых сигналов позволяет выделять информацию из полученных сообщений, вскрывать состав и структуру радиосетей, вести радиоперехват.

Рассмотрим структуру информационных пакетов стандарта DMR (рис. 1). Пакет данных состоит из двух 108-битных информационных полей и 48-битной синхронизации или поля сигнализации (SYNC) [2]. Сигналы синхронизации содержат уникальные наборы битов, которые позволяют идентифицировать каждый из видов передачи (данные, речь) сигналов в соответствии со стандартом DMR.

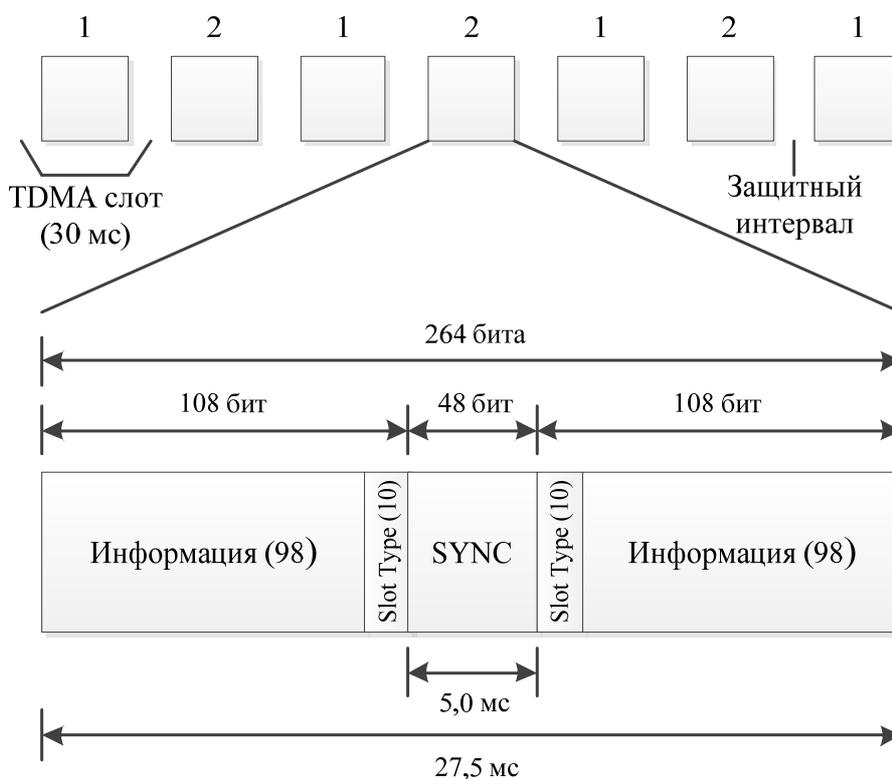


Рис. 1. Обобщенная структура информационного пакета

Приемное устройство, использующее согласованный фильтр, производит изначальную синхронизацию, используя выход согласованного коррелятора, который определяет параметры компенсации отклонения по частоте, также определяя центральную часть пакета.

После синхронизации приемного устройства с каналом происходит проверка на наличие синхропоследовательности путем ее сравнения с эталоном, что позволит определять наличие информации и тип синхронизации, для дальнейшей идентификации содержимого пакета.

В общих случаях качество синхронизации уменьшается в зависимости от вероятности ложного срабатывания детектора (ложная тревога) и от вероятности пропуска синхропоследовательности (пропуск обнаружения). Ложная тре-

вога происходит в том случае, когда интенсивные шумовые помехи создают комбинации, похожие на маркеры. Из-за этого можно принять решение о наличии маркера в тот момент, когда его нет. Пропуск обнаружения маркера может произойти в том случае, когда при взаимодействии с шумом итоговый сигнал получается более похожим на шум, чем на сигнал, и принимается решение об отсутствии маркера [3].

Поэтому главным направлением должна быть оценка этих параметров и создание алгоритма, который уменьшит эти вероятности. При приеме данных от передатчика, приемному устройству нужно определить в какой именно момент на вход приемника начали поступать данные. При когерентном приеме, задача кадровой синхронизации заключается в нахождении максимума корреляционной функции заданной синхропоследовательности и последовательности принимаемой информации [4].

Алгоритм обнаружения сигналов стандарта DMR был реализован в программной среде MATLAB и испытан с помощью устройства USRPB210.

USRP B210 представляет собой полностью интегрированную одноплатную универсальную программную радиопериферийную платформу с непрерывным частотным покрытием от 70 МГц до 6 ГГц. Разработанная для недорогих экспериментов, она сочетает в себе радиопередатчик прямого преобразования AD9361 RFIC, обеспечивающий полосу пропускания в реальном времени до 56 МГц и открытую перепрограммируемую ПЛИС Spartan6 [5].

В качестве передатчика использовалась портативная радиостанция фирмы «Motorola» которая функционирует в соответствии со стандартом DMR.

Алгоритм обнаружения представлен в следующем виде:

1. Задаются исходные данные, необходимые для корректной работы устройства USRP: центральная частота, тактовая частота, частота дискретизации, количество отсчетов буфера радиоприемника, коэффициент усиления и выставляется пороговый уровень энергии сигнала. Параметры фильтров устанавливаются исходя из параметров сигналов стандарта DMR.

2. Подключается база, содержащая типовые сигналы синхронизации пакетов сигнала стандарта DMR.

3. Происходит заполнение буфера радиоприемного устройства заданной длины данными, поступающими из USRP.

4. Осуществляется проверка на превышение заданной пороговой энергии сигнала. В случае, если значение превышает порог, то происходит накопление принимаемых отсчетов до достижения длины вектора сигнала в 30 мс.

5. Полученные данные проходят фильтрацию и демодуляцию.

6. На заключительном этапе происходит сравнение полученного сигнала с эталонной синхропоследовательностью путем расчета и анализа коэффициентов взаимной корреляции.

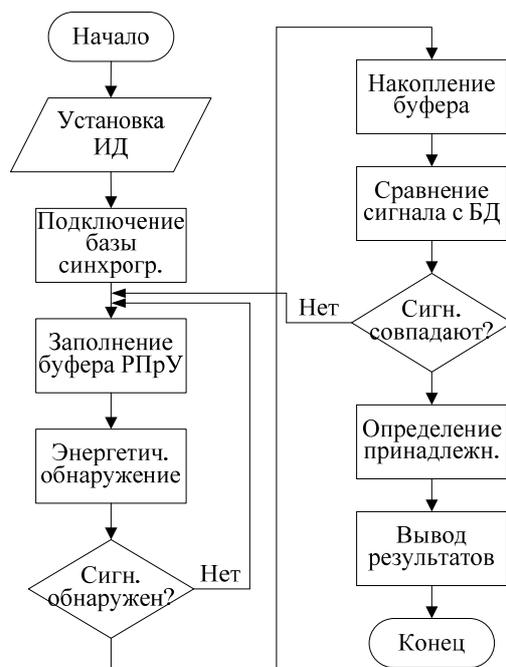


Рис. 2. Алгоритм обнаружения сигналов стандарта DMR

7. В случае совпадения коэффициентов корреляции, выявляется принадлежность принятого сигнала стандарта DMR к типу передаваемого оборудования.

8. Результаты обнаружения отображаются на диалоговом окне.

Алгоритм обнаружения сигналов стандарта DMR представлен на рис. 2.

Так же в программной среде MATLAB был создан интерфейс программного модуля (рис. 3), облегчающий работу с программой и позволяющий наглядно продемонстрировать результаты обнаружения.

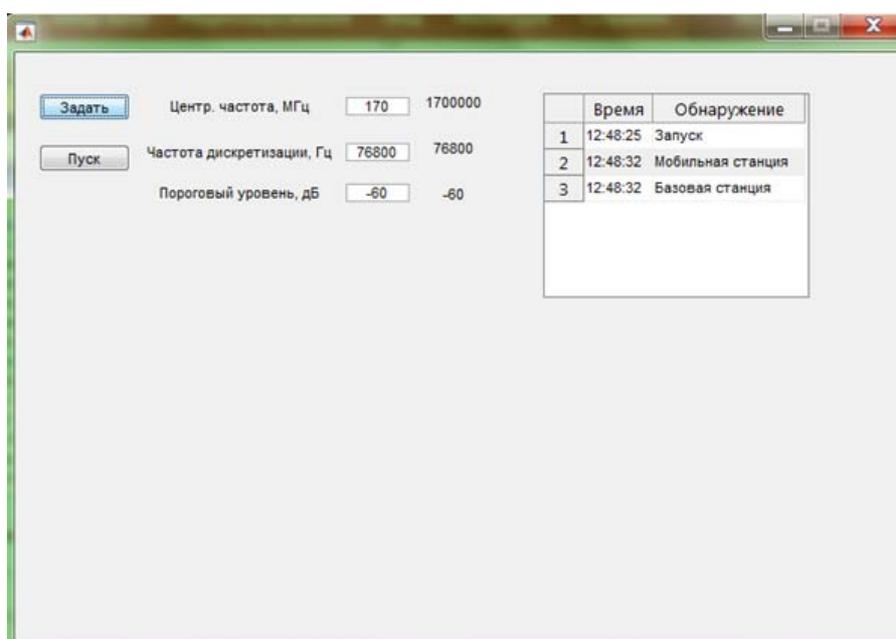


Рис. 3. Интерфейс программы, реализующей алгоритм обнаружения

Таким образом, была продемонстрирована работа программного модуля, реализующего алгоритм обнаружения сигналов стандарта DMR, который поможет значительно сократить время, необходимое для идентификации мобильных радиостанций и вести контроль за использованием различных полос частот.

Список используемых источников

1. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. / Б. Скляр – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. ETSI TS 102 361-1: 2016, IDT Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol.
3. Теоретические основы цифровой радиосвязи : учеб. пособие / Н. И. Листопад [и др.]. – Минск : БГУИР, 2012. – 330 с.
4. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко – СПб. : Питер, 2002. – 608 с.
5. USRP B210 (BoardOnly) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>, свободный (дата обращения: 08.08.2019).

А. С. Разнополов, Р. А. Долбин, С. И. Немченко, Д. А. Баранов
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), Тамбов, Россия)

АЛГОРИТМ ПОИСКА И АНАЛИЗА РАДИОСИГНАЛОВ В КАНАЛАХ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА ПРОТИВНИКА

Аннотация. Предлагается вариант алгоритма обнаружения радиосигналов в каналах управления беспилотных летательных аппаратов на основе технического сравнения параметров радиосигналов методом корреляционного анализа с использованием базы данных стандартов связи беспилотных летательных аппаратов.

A. S. Raznopolov, R. A. Dolbin, S. I. Nemchenko, D. A. Baranov
(The Multiservice Training Center and Radio Electronic Warfare Tactical Employment, Tambov, Russia)

ALGORITHM FOR SEARCHING AND ANALYSIS OF RADIO SIGNALS IN THE CONTROL CHANNEL OF UAV

Abstract. A variant of the algorithm for detecting radio signals in the control channels of unmanned aerial vehicles based on a technical comparison of the parameters of radio signals by the method of correlation analysis using a database of communication standards for unmanned aerial vehicles is proposed.

Борьба с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) противника является актуальной и сложной в решении задачей. Применение малоразмерных БПЛА в современных условиях создает реальную военную и террористическую угрозу особо важным военным объектам и элементам государственной инфраструктуры. В настоящий момент используется огромное количество БПЛА[1], что затрудняет создание универсального средства борьбы с ними. Крупные военные державы развивают несколько концепций борьбы с БПЛА. Наиболее эффективным средством борьбы с БПЛА противника являются средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

В условиях сложной и быстро меняющейся радиоэлектронной обстановки операторам средств РЭБ и офицерам пунктов управления зачастую сложно определить параметры разведываемых радиосигналов (отнести их к определенному классу). Это затрудняет их работу на этапе целераспределения и создания эффективных радиопомех. Данная проблема подчеркивает актуальность разработки алгоритма поиска и автоматизированного анализа радиосигналов в каналах управления БПЛА.

Для подготовки и успешного выполнения боевой задачи подразделениям РЭБ необходимо располагать определенными сведениями о противнике. Эта задача выполняется на этапе анализа радиоэлектронной обстановки (радиоразведки). По результатам радиоразведки определяют:

- вид радиопередачи;
- параметры сигнала (несущая частота, ширина спектра сигнала, длительность сигнала, уровень сигнала и т.д.);
- радиопеленг на источники радиоизлучения (ИРИ).

Таким образом формируется база данных параметров радиосигналов, используемых в каналах управления и передачи данных БПЛА противника. Технический анализ и обработка полученных данных позволит определить принадлежность источника радиосигнала к определенному типу БПЛА.

Для сокращения времени обработки данных о параметрах радиосигнала, определения типа БПЛА противника предлагается алгоритм поиска и автоматизированного анализа технических параметров радиосигналов. Этот алгоритм предлагается использовать в существующих и перспективных автоматизированных средствах обработки сигналов.

В основе реализации предлагаемого алгоритма лежит математический аппарат корреляционного анализа. Корреляционный анализ – метод обработки статистических данных, заключающийся в изучении коэффициентов корреляции. Его применение возможно в случае наличия достаточного количества наблюдений из более чем одной переменной. При этом сравниваются коэффициенты корреляции между одной парой или множеством пар признаков, для установления между ними статистических взаимосвязей.

Формула расчета коэффициента корреляции построена таким образом, что, если связь между признаками имеет линейный характер, коэффициент Пирсона точно устанавливает тесноту этой связи. В общем виде формула для подсчета коэффициента корреляции имеет следующий вид (1):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} = r_{xy} \in [-1, 1], \quad (1)$$

где \bar{x}, \bar{y} – выборочные средние; $r_{xy} \in [-1, 1]$ – выборочные дисперсии.

Степень статистических взаимосвязей может принимать несколько значений (рис. 1).

Perfect	+1	-1
Strong	+0.9	-0.9
	+0.8	-0.8
	+0.7	-0.7
Moderate	+0.6	-0.6
	+0.5	-0.5
	+0.4	-0.4
Weak	+0.3	-0.3
	+0.2	-0.2
	+0.1	-0.1
Zero	0	

Рис. 1. Степени сходства статистических взаимосвязей

Для анализа входных параметров обнаруженного радиосигнала его представляют в форме, необходимой для корреляционного анализа. Аналоговые радиосигналы должны быть оцифрованы, к примеру, с помощью дискретизации сигнала. Дискретизация – представление аналогового непрерывного сигнала $S(t)$ совокупностью его значений, эту совокупность принято называть выборками $S(t_0), S(t_1), \dots, S(t_n)$, взятых в моменты времени t_0, t_1, \dots, t_n .

Имея набор значений амплитуды исследуемого радиосигнала представляется возможным провести корреляционный анализ для дальнейшего поиска полученного сигнала в базе данных.

Предлагаемый алгоритм реализован в информационно-справочной базе данных о радиосигналах «Сигнал 2.0» (рис. 2). Она позволяет оперативно предоставлять справочную информацию о радиосигналах, используемых в различных системах радиосвязи и передачи данных и их характеристиках.

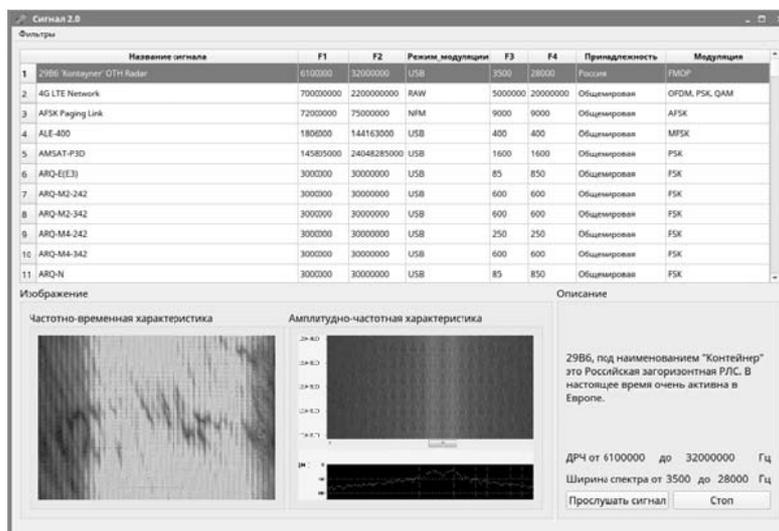


Рис. 2. Интерфейс информационно-справочной базы данных о радиосигналах «Сигнал 2.0»

Основными возможностями информационно-справочной базы данных о радиосигналах «Сигнал 2.0» являются:

- представления основных характеристик сигналов (диапазон, ширина спектра, вид модуляции, государственная принадлежность);
- визуальное отображение частотно-временной и амплитудно-частотной характеристик сигналов;
- звуковое воспроизведение сигналов;
- поиск сигналов по различным фильтрам;
- добавление новых сигналов;
- автоматическое сравнение сигнала из базы данных с сигналом, полученным в ходе ведения радиоразведки (рис. 3).



Рис. 3. Интерфейс визуализации автоматизированного алгоритма сравнения технических параметров радиосигналов

В качестве среды для разработки программы используется Qt. Qt – кросс-платформенная среда разработки программного обеспечения на языке программирования C++. Системой управления базой данных (СУБД) выбрана SQLite, так как является встраиваемой и может поставляться как составная часть некоторого программного продукта, не требуя процедуры самостоятельной установки [2, 3].

Таким образом, предлагаемый алгоритм минимизирует время обработки данных о технических параметрах радиосигнала, а также повышает точность определения конкретного радиосигнала. Следует отметить необходимость постоянного совершенствования базы данных о радиосигналах и постоянного добавления новых радиосигналов. Все это в совокупности позволит операторам средств РЭБ и офицерам пунктов управления эффективно подавлять каналы управления БПЛА.

Список используемых источников

1. Погорелов, В. И. Беспилотные летательные аппараты: нагрузки и нагрев : учебное пособие для вузов / В. И. Погорелов. – 2-е изд. исп. и доп. – ЮРАЙТ, 2011. – 15 с.
2. Информационные системы и технологии : научное издание / под ред. Ю. Ф. Тельнова. – М. : ЮНИТИ, 2016. – 303 с.
3. Агальцов, В. П. Базы данных : в 2-х т. Т. 1. Локальные базы данных: учебник / В. П. Агальцов. – М. : ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 352 с.

Т. М. Полякова, А. П. Савенков, К. Е. Чечетов
(Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия)

ПРОСТЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ОБЪЕКТОВ НА КОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Аннотация. Представлены быстрые алгоритмы поиска темной области в одном из каналов восьмибитного RGB-изображения и определения геометрических размеров этой области.

T. M. Polyakova, A. P. Savenkov, K. E. Chechetov
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

SIMPLE ALGORITHMS FOR DETECTING AND SIZING OBJECTS ON CONTRAST IMAGES

Abstract. Fast algorithms for finding a dark region in one of the channels of an eight-bit RGB image and determining the geometric dimensions of this region are presented.

Взаимодействие газа и жидкости с формированием свободной поверхности раздела фаз встречаются во многих технологических и природных явлениях. Один из видов подобного взаимодействия – формирование углубления на поверхности жидкости под действием газовой струи. В настоящее время разрабатываются бесконтактные методы измерения поверхностного натяжения, основанные на физических эффектах разной природы [1]. Часто для исследований и моделирования процессов в различных газожидкостных системах используют прозрачные жидкости, что позволяет применять оптические методы измерений геометрических параметров поверхности раздела фаз.

В ряде случаев исследователи определяют геометрические параметры взаимодействия струи газа с жидкостью по фотографиям поверхности раздела. Такой способ обладает невысокой точностью в силу ряда особенностей. Чтобы повысить точность измерений параметров поверхности раздела фаз используют теневой метод, заключающийся в просвечивании жидкости горизонтальным коллимированным лучом света с получением изображения углубления на полупрозрачном экране. Современная техника позволяет добиться высокой точности определения параметров при простоте технической реализации измерений [1, 2].

В настоящей работе описаны алгоритмы системы технического зрения для измерения параметров поверхности раздела газовой и жидкой фаз по изображениям, полученным теневым методом.

На рисунке 1 представлен результат определения размеров углубления, сформированного газовой струей на поверхности жидкости. Углубление симметрично относительно вертикальной оси. Его основным геометрическим параметром является высота h . Черная область над белой линией представляет собой изображение менисков, образующихся на краях емкости с жидкостью, черная область, ограниченная белой линией и зелеными точками – изображение углубления.

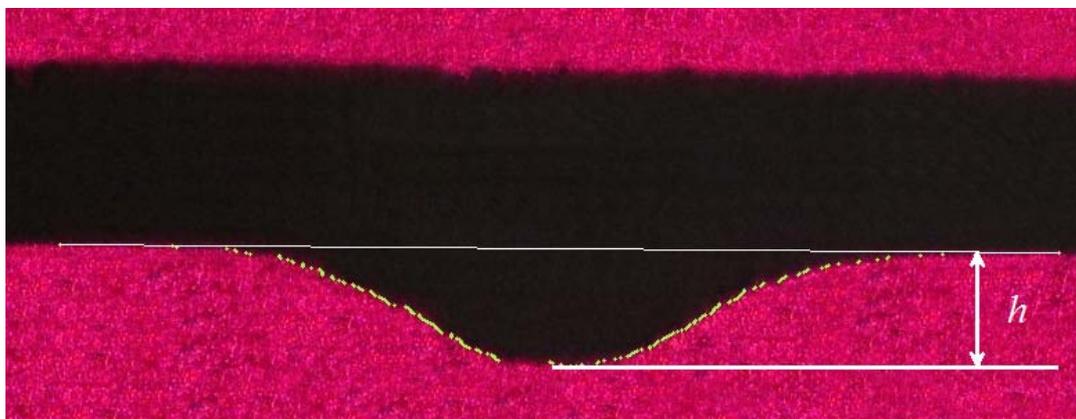


Рис. 1. Результат определения размеров углубления при помощи системы технического зрения

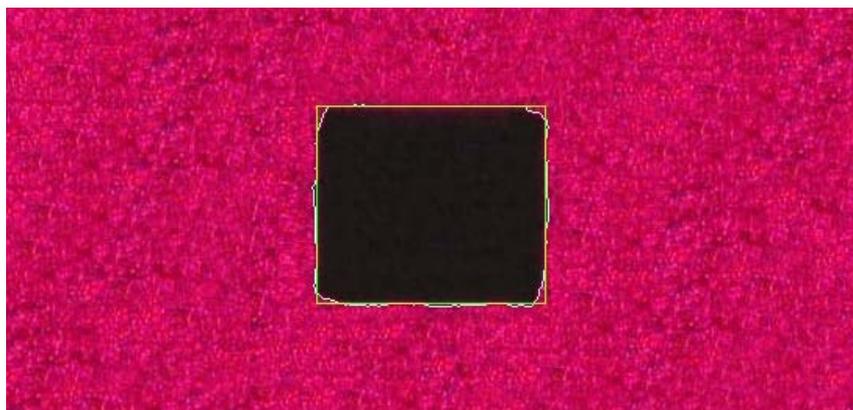


Рис. 2. Результат определения размеров калибровочного прямоугольника

Размеры углубления определяются в пикселях. Для калибровки системы технического зрения вместо емкости с жидкостью на пути распространения луча устанавливается экран с непрозрачным прямоугольником с известными размерами (рис. 2). После определения системой технического зрения размеров этого прямоугольника в пикселях устанавливается размер пикселя и геометрические параметры углубления в миллиметрах.

На рисунке 2 белыми линиями показаны результаты определения размеров калибровочного прямоугольника, желтыми – среднее арифметическое этих результатов с исключенными грубыми погрешностями.

Перед определением границ углубления или прямоугольника на их изображениях проводится получение гистограммы (рис. 3). В связи с тем, что для получения изображения используется лазер красного цвета, составляется гистограмма только по красному каналу восьмибитного трехканального RGB-изображения. Алгоритм анализирует изображение, фиксируя количество пикселей (отложены по оси ординат в диапазоне от 0 до 100%), соответствующих определенной яркости (отложены по оси абсцисс в диапазоне от 0 до 255).

На рисунках 1 и 2 четко видны границы раздела фаз, газовая фаза имеет меньшую яркость, чем жидкая. Два максимума на гистограмме (рис. 3) соответствуют яркостям светлых и темных участков изображений. Для определения границ черных областей по гистограмме находится яркость, соответствующая минимуму между двумя максимумами.

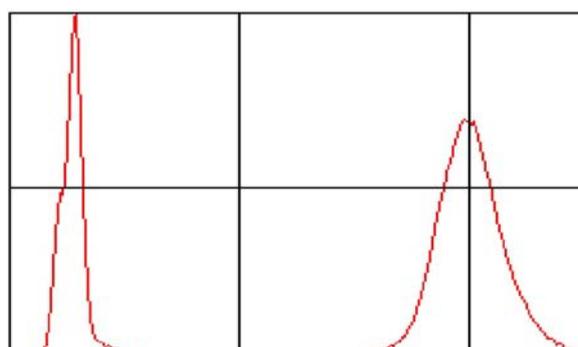


Рис. 3. Типичная гистограмма изображений на экране

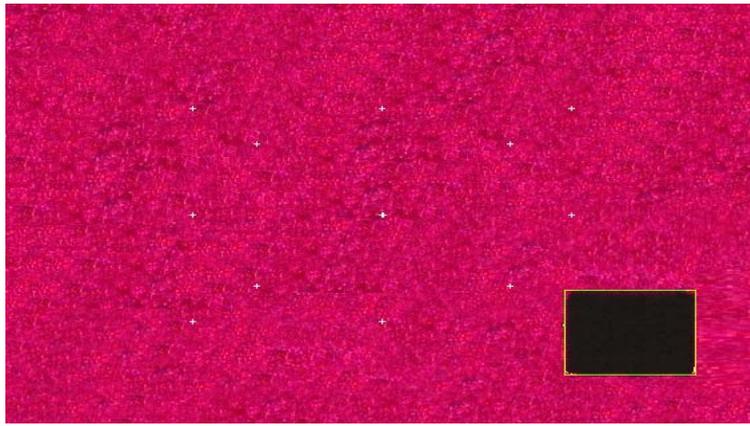


Рис. 4. Иллюстрация алгоритма поиска черной области на изображении

После определения граничной яркости выполняется поиск черной области. Используемый нами алгоритм более быстрый и не менее эффективный, чем анализ каждого пикселя изображения. Работа алгоритма проиллюстрирована на рис. 4.

Анализируются пиксели с шагами, равными одной n -й доли размеров картинке по вертикали и горизонтали, где $n = 2, 3, 4, \dots$. Если яркость рассматриваемого пикселя (показаны на рис. 4 белыми точками) больше граничной, то программа продолжает исследовать изображение, увеличивая n до тех пор пока значения шагов не станут меньше заданных (100). Заданное значение определяется необходимой точностью определения геометрических параметров углублений и прямоугольника.

После нахождения точки в темной области для определения размеров квадрата проводится поиск пикселей с яркостью, превышающей граничное значение, путем перемещения по картинке поочередно по всем направлениям параллельным ее сторонам. При этом для снижения влияния шума на результат измерения получают координаты всех пикселей на границе (см. рис. 2 и 4).

Для нахождения формы, образующей углубления на первом этапе проводится поиск его нижней точки (рис. 5). От первой полученной в темной области

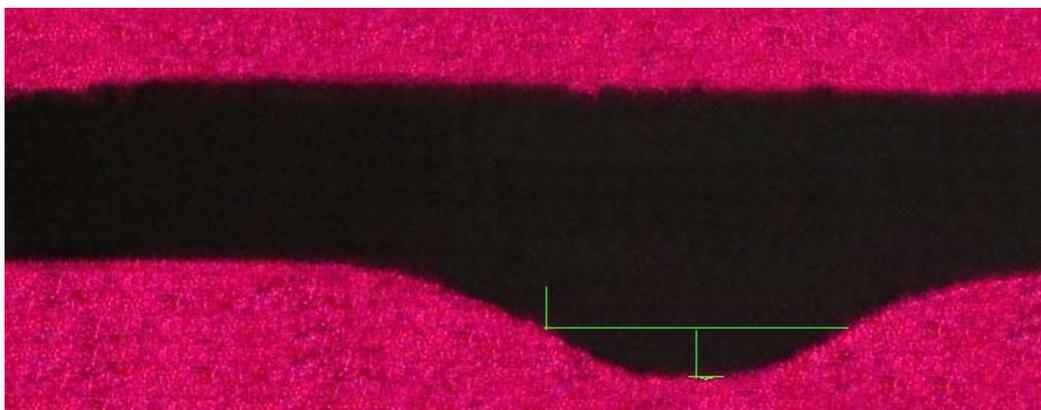


Рис. 5. Иллюстрация алгоритма нахождения нижней точки углубления

точки реализуется попиксельное перемещение вниз до границы с красной областью. Далее реализуется движение до границ влево и вправо из точки на один пиксель выше полученной. После этого находится среднее арифметическое горизонтальных координат в полученных точках и снова осуществляется движение вниз из полученной точки. После определения границы вновь выполняются перемещения влево и вправо. Этот цикл повторяется до того момента, когда не будет возможности реализовывать перемещения до границ темной области.

Для определения образующей углубления и его высоты осуществляются перемещения влево и вправо из каждой точки над нижней точкой углубления до тех пор, пока не будут достигаться боковые границы изображения (рис. 6).



Рис. 6. Иллюстрация алгоритма образующей и высоты углубления

Предложенный алгоритм может быть использован для измерения высоты углублений на изображениях, полученных теневым методом. Помимо этого, имеет возможность находить и детектировать края темных участков на изображении, которые могут представлять из себя как правильные геометрические фигуры, так и неправильные формы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание), проект 8.13393.2019/13.1 «Роботизированная система мониторинга и диагностики фитозаболеваний плодоовощных культур».

Список используемых источников

1. Мордасов, М. М. Аэродинамическое измерение поверхностного давления / М. М. Мордасов, А. П. Савенков, К. Е. Чечетов // Измерительная техника. – 2018. – № 6. – С. 50 – 55.
2. Мордасов, М. М. Измерение геометрических параметров поверхностей раздела газожидкостных систем / М. М. Мордасов, А. П. Савенков // Измерительная техника. – 2015. – № 7. – С. 47 – 49.

А. А. Найденов, А. С. Сысоев
(Липецкий государственный технический университет,
Липецк, Россия)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВИДЕОФИКСАЦИИ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. Целью данной работы является разработка системы детектирования автотранспортных происшествий на основе данных видеофиксации и методов машинного обучения. В работе проведен обзор известных методов и моделей построения нейронных сетей. Разработана модель системы принятия решений для распознавания происшествий и выполнена ее программная реализация.

A. A. Naidenov, A. S. Sysoev
(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

DEVELOPING CAR ACCIDENT DETECTING SYSTEM BASED ON MACHINE LEARNING ALGORITHMS APPLIED TO VIDEO RECORDINGS DATA

Abstract. The main purpose of this study is to develop a car accident detecting system using data obtained from video recordings streams applying machine learning algorithms. The paper contains the overview of modern machine learning methods and related neural network models. Decision-making system model was developed for car accidents recognition and its program implementation was done.

Значение и потенциал поставленной задачи. Актуальность и ценность системы распознавания автотранспортных происшествий состоит не только в том, что такая разработка сможет стать частью системы дорожного регулирования, но и в применении ее в альтернативном направлении: проектирование искусственного интеллекта беспилотных автомобилей. Рассуждения на эту тему приводят к дорожным картам НТИ. Национальная технологическая инициатива (НТИ) – государственная программа мер по поддержке развития в России перспективных отраслей, которые в течение следующих 20 лет могут стать основой мировой экономики [1]. Решение задачи, поставленной в данной работе, можно отнести к рынку Автонет. Основное направление данного рынка – беспилотные автомобили и интеллектуальные транспортные системы. Направления развития для поставленной задачи указаны в нормативной дорожной карте рынка Автонет [2]. «Дорожные карты» – документы стратегического планирования, содержащие комплекс мероприятий, взаимосвязанных по задачам, срокам осуществления и ресурсам. Таким образом, подтверждается не только

своевременность, но и поддержка подобных решений со стороны государства и крупных организаций. Подобная проблема имеет всего несколько решений [3, 4], и практически не имеет аналогов на отечественном рынке.

Основные этапы проектирования нейронной сети. На фундаментальном уровне можно выделить две основные части нейросети: сверточная основа и полносвязный классификатор. Основа представлена одной известной архитектурой CNN -VGG16. Это сверточная сеть, заранее обученная более чем на 1.4 миллионах экземпляров, способная распознавать 1000 классов различных изображений. Подобная архитектура была разработана в 2014 году, однако, существуют и другие реализации CNN. Стоит отметить, что данная модель является не самой удобной и быстрой, однако, ее эффективность оправдывает выбор.

```

Found 1284 images belonging to 2 classes.
Found 234 images belonging to 2 classes.
Found 232 images belonging to 2 classes.

```

Layer (type)	Output Shape	Param #
vgg16 (Model)	(None, 4, 4, 512)	14714688
flatten_1 (Flatten)	(None, 8192)	0
dense_1 (Dense)	(None, 256)	2097408
dense_2 (Dense)	(None, 1)	257

```

Total params: 16,812,353
Trainable params: 16,812,353
Non-trainable params: 0

```

Рис. 1. Визуализация архитектуры всей сети

Если говорить о метаданных, то можно выделить следующие параметры: 100 эпох и 35 стеков слоев. Согласно многим источникам [5 – 9] такое количество слоев является оптимальным для своих групп.

Ключевым фактором при построении модели была точность распознавания объектов. Основных методов, благодаря которым удалось значительно повысить эффективность всей сети, было несколько: использование заранее обученной нейросети, выделение признаков с расширением данных и дообучение полносвязного классификатора. Масштаб обучения и обобщенность данных, использованных при обучении VGG16, позволяет использовать полученную в результате обучения сети пространственную иерархию признаков. Другими словами, натренированная сеть может быть использована как основа для обучения другой сети, даже если новая сеть будет оперировать абсолютно новыми

классами изображений. Первые слои находят обобщенные признаки, в то время как более глубокие находят конкретные. Так как VGG16 не хранит информации о классе автотранспортных происшествий, то имеет смысл переобучить и последний блок сверточной основы. После определения основы было решено использовать метод выделения признаков с расширением данных. Этот метод является частью более глобального метода дообучения. В этом случае каждое изображение будет постоянно проходить основу, в отличие от способа без расширения данных, когда сверточная основа проходится лишь однажды. Безусловно, использование этого метода увеличивает вычислительную сложность, но также гарантированно увеличит точность сети. Само расширение данных – это метод, позволяющий понизить переобучение. Этот эффект связан с множеством причин, одной из которых является недостаток данных. Решением стал генератор, который преобразует исходные изображения из выборки путем сжатия, растягивания, переворота и так далее. Так можно получить двойную выгоду: нейросеть никогда не увидит одно и то же изображение дважды. Вследствие этого учтет все аспекты изображения. Вторым воздействием будет недостижение переобучения. К этому моменту были проведены основные этапы, необходимые для дообучения: добавление новой сети, поверх обученной, заморозка этой сети и обучение добавленной части. Дообучение состоит в разморозке последнего блока сверточной основы и добавление поверх классификатора, для совместного обучения. Использование лишь последнего блока VGG16 обусловлено низкой полезностью первых слоев из-за общности выделяемых ими признаков. При этом большой объем переобучаемых признаков повысит уровень переобучения. Фактически дообучение корректирует представления, чтобы подстроить их под новую задачу.

Распознавание автотранспортных на основе данных видеофиксации и методов машинного обучения. Для проведения работы была использована выборка, представленная авторами работы *Anticipating accidents in dashcam videos* [3]. Ее также представляли на азиатском форуме компьютерного зрения в 2016 году. Она состоит из множества различных видео, представляющих из себя записи с видеорегистраторов. Выборка содержит в себе записи, как и с моментами происшествий, так и без них. Весь набор состоит из 1730 видео, поделенных случайным образом на тренировочную и проверочную часть. Таким образом, тренировочная часть состоит из 1284 видео, среди которых 455 положительных и 829 отрицательных экземпляров. Аналогично, проверочная часть содержит 466 отрезков, поделенных на 165 положительных и 301 отрицательный образец соответственно. В дополнение к этому проверочная часть была разделена пополам, чтобы сформировать тестовую выборку, на которой проверялось бы качество распознавания обученной нейросети. Также в тестовую выборку вошли видеозаписи из сводок новостей местных информационных порталов [10 – 12].



Рис. 2. Образец тестовой выборки

Работа проводилась на компьютере со следующими техническими характеристиками:

Процессор: Intel(R) Xeon(R) Silver 4116 CPU @ 2.10 GHz. Количество ядер: 24.

Видеокарта: NVIDIA Tesla P4. Объем NVRAM: 8 Гб.

Объем RAM: 32 Гб.

Объем HDD: 1 Тб

Операционная система: Windows 10 64-bit.

Время, затраченное на преобразование изображений, обучение и тестирование сети составляет около 2–3 часов. Такое долгое время работы связано частично с тем, что в качестве оптимизатора функции потерь выбран RMSProp, однако его выбор оправдан бережностью к имеющимся представлениям сети. Другой оптимизатор мог бы их повредить. После окончания всех операций были выведены графики точности и потерь на тренировочной и тестовой выборке. Для наглядности линии на графиках были сглажены, чтобы более четко различать тенденцию.

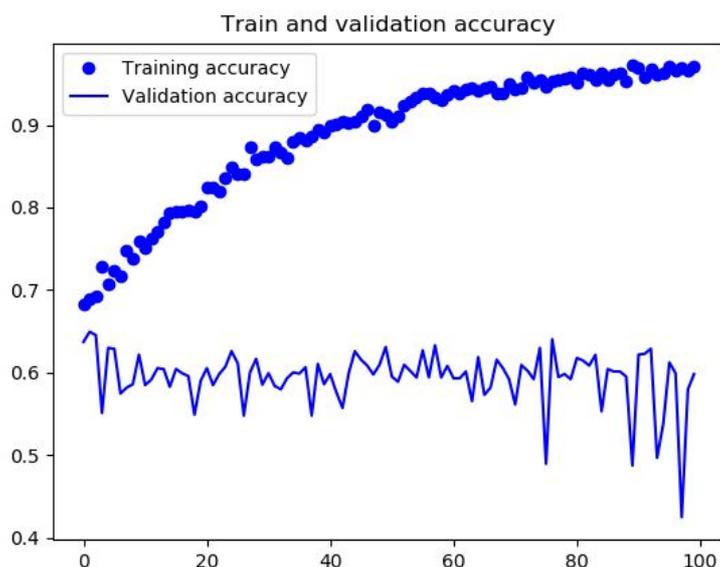


Рис. 3. График точности распознавания

Результаты, полученные в результате работы нейросети, составляют 97% на тренировочной выборке и 60% на тестовой. Данный результат можно считать достойным. Стоит также отметить, что это не лучший результат. Если переобучить сеть, то можно улучшить точность на тестовых данных на несколько процентов, а возможно даже и больше.

Заключение. Была разработана модель системы принятия решений для распознавания происшествий и выполнена ее программная реализация. Результаты распознавания составили 97% и 60% соответственно. Предложенная модель будет улучшаться и станет частью программного комплекса, способного не только распознавать автотранспортные происшествия, но и строить кратчайший маршрут экстренным службам до места ДТП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-10034).

Список используемых источников

1. Национальная технологическая инициатива (НТИ) // НТИ2035. – URL : <http://nti2035.ru>, 2019.
2. Нормативные дорожные карты. Автонет. – 2019.
3. Anticipating accidents in dashcam videos / F.-H. Chan, Y.-T. Chen, Y. Xiang, M. Sun // Asian Conference on Computer Vision. – 2016. – С. 136 – 153.
4. CrashCather by rwk506, <https://github.com/rwk506/CrashCatcher>.
5. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле. – СПб. : Изд-во Питер, 2018. – 400 с.
6. Шакла, Н. Машинное обучение и TensorFlow / Н. Шакла. – СПб. : Изд-во Питер, 2019. – 336 с.
7. Rosebrock, D. A. Deep learning for computer vision with Python / D. A. Rosebrock. – PyImageSearch, 2017. – 332 с.
8. Николенко, С. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / С. Николенко, А. Кадурич, Е. Архангельская. – СПб. : Изд-во Питер, 2018. – 481 с.
9. Howse J., Joshi P., Beyeler M. Computer Vision Projects with Python. – PacktPublishing, 2016. – 558 с.
10. Серьезное ДТП случилось под Липецком. – URL : // [http://www.lipetskmedia.ru/news/view/115566-Syeryeznoye DTP.html](http://www.lipetskmedia.ru/news/view/115566-Syeryeznoye_DTP.html)
11. Грузовик врезался в трамвай на 21-м микрорайоне в Липецке. – URL : // [http://www.lipetskmedia.ru/news/view/115986-Gruzovik vryezalsya.html](http://www.lipetskmedia.ru/news/view/115986-Gruzovik_vryezalsya.html)
12. Массовое ДТП парализовало движение у арбитражного суда. – URL : // [http://www.lipetskmedia.ru/news/view/115715-Massovoye DTP.html](http://www.lipetskmedia.ru/news/view/115715-Massovoye_DTP.html)

Д. В. Лакомов, Г. Аль Маамари
(Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия)

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМАМИ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРОДА

Аннотация. Представлено описание информационной технологии для распознавания в автоматическом режиме объектов систем жизнеобеспечения города на графических изображениях на основе разработанного алгоритма контурного анализа изображений.

D. V. Lakomov, G. Al Maamari
(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

INFORMATION TECHNOLOGY OF PROCESSING GRAPHIC IMAGES IN THE MANAGEMENT OF LIFE-SUPPORT SYSTEMS OF THE CITY

Abstract. The article presents the description of information technologies for pattern recognition in the automatic mode of objects of life-support systems of the city on the graphic images on the basis of the developed algorithm, the contour image analysis.

В связи с постоянно возрастающим антропогенным воздействием, неудовлетворительным состоянием окружающей среды, истощением природных ресурсов, увеличением масштабов воздействия загрязнений на окружающую среду исследованию проблем точечных и площадных объектов придается особое значение.

Все множество пикселей изображения сосредоточенных и площадных объектов представляет собой матрицу P :

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{X1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1Y} & \cdots & p_{XY} \end{pmatrix},$$

где p_{ij} – цветное значение пикселя изображения; X – ширина изображения; Y – высота изображения.

Обозначим множество, создаваемое из всех элементов матрицы $P \rightarrow P_u$.

Этап 1. Предварительный этап. Преобразование изображения в градации серого [1]. Для этого достаточно представить изображение в YUV модели. В модели YUV цвет представляется в виде трех величин: непосредственно значение яркости – Y ; U и V – вспомогательные величины, необходимые для вос-

становления исходного цвета. Величина Y содержит яркостную информацию, а по величинам U и V восстанавливается исходный цвет. Переход из стандартной модели RGB в модель YUV осуществляется по формулам:

$$\begin{aligned} Y &= 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B, \\ U &= -0,14713 \cdot R - 0,28886 \cdot G + 0,426 \cdot B, \\ Y &= 0,615 \cdot R - 0,51499 \cdot G - 0,10001 \cdot B + 128, \end{aligned}$$

где R, G, B – интенсивности красного, зеленого и синего цветов [2].

Этап 2. Фильтрация шумов. Для снижения негативных последствий от размытия изображения необходима фильтрация шумов. В алгоритме для фильтрации шумов применяется сглаживание изображения [3]. В качестве фильтра сглаживания в алгоритме применяется функция Гаусса.

Этап 3. Вычисление значений и направления градиентов. Вычисление значений градиентов в пикселях осуществляется в четырех направлениях: вертикальном, горизонтальном и двух диагональных. Получаем взаимно-однозначное соответствие пикселя и его значения градиента яркости – g_{ij} .

Значение угла градиента округляется и принимает значение кратное 45: 0, 45, 90 или 135 градусов. Для вычисления значений градиентов в разработанном алгоритме применяется оператор Робинсона [4].

Этап 4. Подавление пикселей с не максимальными значениями градиента. Пикселями границы считаются пиксели, имеющие максимальное значение градиента (локальный максимум) по отношению к соседним пикселям по направлению вектора. Остальные пиксели подавляются. Их цветовые характеристики RGB получают значение белого цвета (255, 255, 255) [5]. Дальнейшая работа проводится только с пикселями границы. Обозначим множество пикселей границы – C :

$$C = \{p_{ij} | p_{ij} \neq (255, 255, 255)\}, 1 \leq i \leq X, 1 \leq j \leq Y.$$

Все остальные пиксели изображения объединяем во множестве W :

$$\begin{aligned} W &= \{p_{ij} | p_{ij} = (255, 255, 255)\}, 1 \leq i \leq X, 1 \leq j \leq Y, \\ C \cup W &= P_u. \end{aligned} \quad (1)$$

Этап 5. Двойная пороговая фильтрация. Все пиксели, являющиеся локальными максимумами, на четвертом этапе проходят через два порога T_{\min} и T_{\max} , задаваемых пользователем. При значении градиента пикселя менее минимального порога, пиксель становится частью множества W , и получает значение белого цвета. Если значение пикселя больше максимального порога, то данный пиксель является контурным и становится частью множества C . Все пиксели, попавшие между пороговыми значениями, обрабатываются на последнем этапе [6].

В формализованном виде этот этап представлен как:

$$\begin{cases} p_{ij} \in C, \text{ при } g_{ij} > T_{\max}; \\ p_{ij} \in W, \text{ при } g_{ij} < T_{\min}; \\ p_{ij} \in N, \text{ при } T_{\min} < g_{ij} < T_{\max}. \end{cases}$$

где N – множество пикселей, значения градиента которых попадают между двумя пороговыми значениями, тогда выражение (1) принимает вид:

$$C \cup W \cup N = P_u. \quad (2)$$

Этап 6. Проработка области между двумя пороговыми значениями. На заключительном этапе происходит обработка пикселей, принадлежащих множеству N . Для всех пикселей множества N проверяется условие: если хотя бы один из соседних пикселей является граничным, то проверяемый пиксель также считается граничным. Основная задача данного этапа – проанализировать все пиксели множества N таким образом, чтобы учесть группы пикселей целиком находящихся в данном множестве и являющихся граничными [7]. Все остальные пиксели, которые в результате проверки оказались не граничными, получают значение белого цвета. Это реализуется с помощью разработанного нами алгоритма.

Основными отличительными особенностями представленного алгоритма является следующее:

1. В начале алгоритма трассировки на стек кладется текущий индекс, для которого значение элемента матрицы больше верхнего порога фильтрации в матрице. Соответственно вершина стека становится равной единице.

2. Извлекается верхний элемент стека, что приводит к его уменьшению на единицу.

3. Находятся восемь соседних индексов от индекса, извлеченного со стека.

4. Для всех соседних индексов проверяется, если значение матрицы в этом индексе больше минимального порога фильтрации, и он ранее не был помечен как прошедший, то индекс помечается как прошедший и кладется на вершину стека.

Проведенные исследования (рис. 1, 2) показали, что модернизированный алгоритм контурного анализа находит на 10...15% больше граничных точек при анализе графических изображений сосредоточенных и площадных объектов, чем стандартный алгоритм Канни, а время выполнения алгоритма увеличивается незначительно.

Рекомендуемые параметры работы алгоритма для четких графических изображений: $T_{\min} = 20$, $T_{\max} = 45$, $\sigma = 1$.

Рекомендуемые параметры работы алгоритма для размытых изображений: $T_{\min} = 5$, $T_{\max} = 15$, $\sigma = 0,01$.

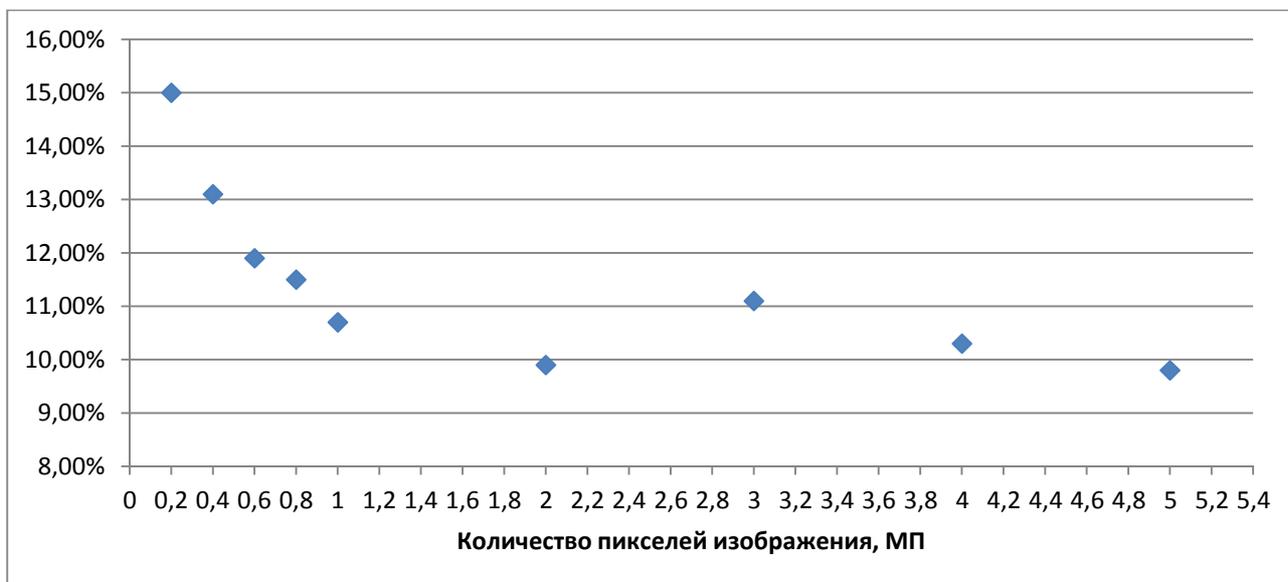


Рис. 1. Увеличение количества найденных контурных точек разработанного алгоритма контурного анализа по сравнению со стандартным алгоритмом Канни

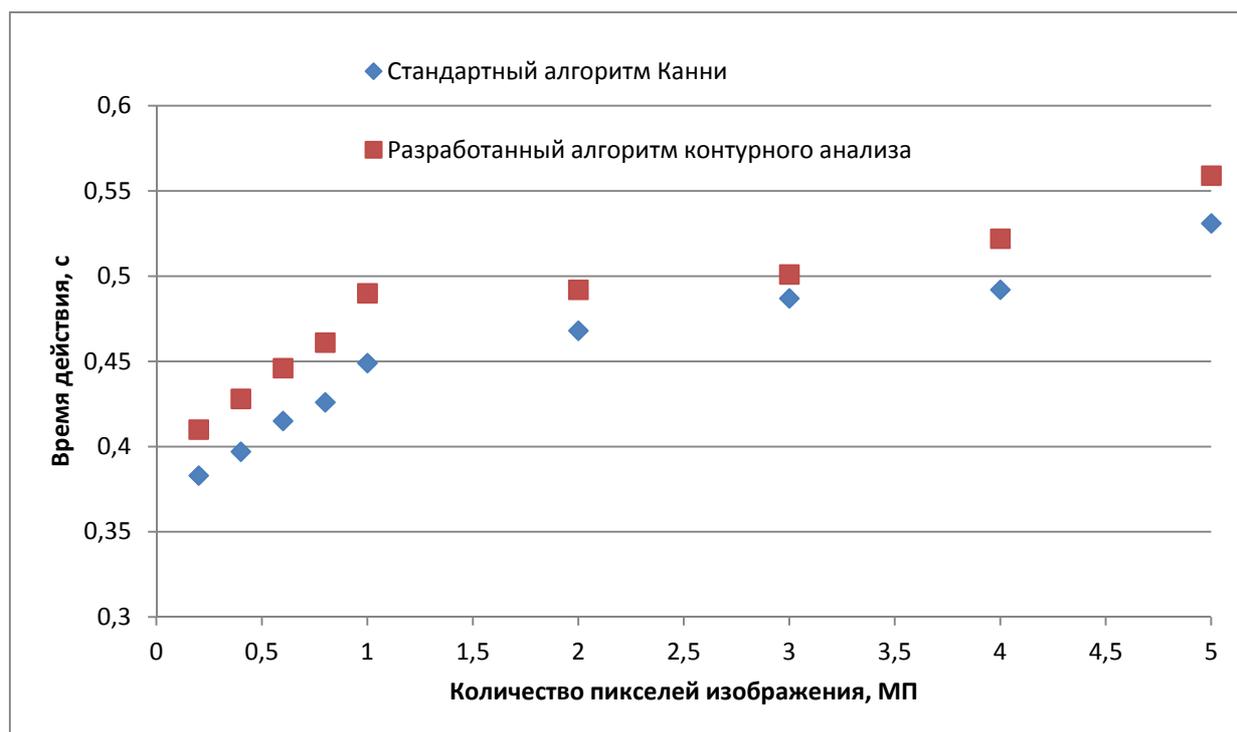


Рис. 2. Время работы алгоритмов с изображениями разного объема

Достоинствами модернизированного алгоритма Канни являются:

- увеличение количества найденных граничных точек;
- минимизация фрагментации контуров объектов на изображении;

- повышение значения отношения мощности полезного сигнала к мощности шума;
- снижение неопределенности при анализе зашумленных изображений, за счет фильтра Гаусса.

Недостатками разработанного алгоритма контурного анализа является:

- отсутствие однозначных критериев выбора пороговых значений, что приводит к искажению и потере части реальных контуров и к появлению ложных контуров.

Результаты исследования возможно применять в системах технического зрения, применяемых для выявления повреждений и мониторинга анализируемых объектов, а также при создании тренажеров для подготовки операторов комплексов мониторинга точечных и площадных объектов. Кроме того, применение разработанного алгоритма целесообразно при обнаружении нарушений целостности точечных и площадных объектов, а также в системах поддержки принятия решений.

Список используемых источников

1. Местецкий, Л. М. Математические методы распознавания образов / Л. М. Местецкий. – М. : МГУ, 2004. – 144 с. ISBN 978-5-9221-0841-6.
2. Карасев, П. И. Процедура обработки графических изображений в системах видеонаблюдения / П. И. Карасев, Ю. А. Губсков – Воронеж : Вестник Воронежского института ФСИН России, 2015. – № 2. – С. 35 – 37.
3. Ким, Н. В. Применение систем технического зрения на беспилотных летательных аппаратах в задачах ориентации на местности / Н. В. Ким. – М. : Изд-во Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2010. – № 3. – ISSN 0869-6101
4. Потапов, А. А. Новейшие методы обработки изображений / А. А. Потапов. – М. : Издательство ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 494 с. ISBN 978-5-9221-0841-6.
5. Фурман, Я. А. Введение в контурный анализ. Приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман. – М. : Издательство ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 592 с. – ISBN 5-9221-0255-9.
6. Кравченко, В. Ф. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / В. Ф. Кравченко. – М. : Издательство ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 553 с. – ISBN 978-5-9221-0871-3.
7. Ким, Н. В. Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения / Н. В. Ким, И. Г. Крылов // Электронный журнал «Труды МАИ». – Вып. № 62.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ

И. Н. Ищук¹, С. Н. Глинчиков¹, Б. К. Тельных¹, Ю. Ю. Громов²

(¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и
Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия;

²Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия)

УСТРОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация. Рассмотрена структура устройства технического контроля для определения теплофизических параметров (ТФП) композиционных материалов (КМ). Рассмотрена экспериментальная установка, позволяющая определять высокотемпературную термостойкость компонентов углеродсодержащих КМ и защитных покрытий на предмет образования термоциклической повреждаемости в виде трещин, расслоений, сколов, химического взаимодействия элементов КМ беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

I. N. Ischuk¹, S. N. Glinchikov¹, B. K. Telnykh¹, Yu. Yu. Gromov²

(¹Military Training and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy
named after Professor N. Ye. Zhukovsky and Yu. A. Gagarina”, Voronezh, Russia;

²Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

DEVICES OF TECHNICAL CONTROL OF POWER STRUCTURES FROM COMPOSITE MATERIALS OF UNMANNED AIRCRAFT

Abstract. The structure of the technical control device for determining the thermophysical parameters (TFP) of composite materials (CM) is considered. An experimental setup is considered that allows one to determine the high-temperature heat resistance of carbon-containing CM components and protective coatings for the formation of thermocyclic damage in the form of cracks, delaminations, chips, chemical interaction of CM elements of unmanned aerial vehicles (UAVs).

Введение. Различные варианты устройств технического контроля (УТК) предлагались ранее [1], но требуется существенная доработка и модернизация блока определения теплофизических параметров, с целью повышения точности определения теплофизических параметров (ТФП). Кроме того, опыт работы УТК выявил некоторые недостатки конструкции системы, связанные со стабильностью во времени показаний измерения температуры. Таким образом, опираясь на опыт разработки уже существующих программно-технических

комплексов, определения ТФП предполагается доработать и модернизировать УТК с целью расширения возможностей комплекса и повышения точности, сделав основной упор на разработку УТК.

1. Описание устройства технического контроля

Структура УТК включает в себя следующие виды обеспечений [1, 2]:

- техническое – комплекс всех технических средств, предназначенных для обеспечения работы УТК;
- информационное – совокупность системы классификации и кодирования технологической информации, сигналов, характеризующих состояние объекта, данных, необходимых для выполнения всех функций УТК, составная часть – база данных эталонов;
- программное – совокупность всех программ, обеспечивающая реализацию функций системы измерения и контроля экспериментов, заданное функционирование комплекса всех технических средств;
- математическое – совокупность методов, математических моделей и алгоритмов, необходимых для выполнения функций УТК, представляемых в заданной форме;
- организационное – совокупность описаний функциональной, технической и организационной структур, инструкций и регламентов для оперативного персонала, обеспечивающая заданное функционирование.

Анализируя взаимосвязь компонентов УТК и выполняемых ими функций, структурно УТК может быть представлена как совокупность измерительной системы и автоматизированного рабочего места (АРМ) с установленным системным программным обеспечением (СПО) и базы данных.

Методика экспериментальной апробации состоит из трех этапов: подготовительный, эксперимент и обработка данных. Подготовительным этапом является: чернение поверхности материала с известными ТФП; измерение теплового потока; юстировка тепловизионного прибора; определение инструментальной погрешности. Необходимо отметить, что второй и третий этапы полностью автоматизированы и проходят под управлением СПО. В ходе второго этапа тепловой импульс, терморегулируемый контроллером на базе микропроцессора АРДУИНО, блоком питания и термостабилизации лазерных диодов LDD-10N, с помощью ИК-лампы или лазерной головки нагревает определенную область на поверхности материала в течение заданного времени. В результате дистанционного измерения радиационной температуры тепловизором, управляемым СПО полученные в течение заданного времени термограммы записываются в базу данных ЭВМ.

Рассмотрим алгоритм (последовательность) реализации методики прогнозирования изменений ТФП композиционного материала:

Шаг 1. Юстировка тепловизионного прибора, определение инструментальной погрешности на материале с известными ТФП, измерение теплового потока.

Шаг 2. Подготовка 1-го материала – зачернение, до заданной температуры. Проведение серии экспериментов с использованием установки лазер – тепловизор – ноутбук – СПО. Получение и запись термограмм на стадиях нагрева-остывание.

Эталонирование на основе полученных термограмм – получение температурно-временных зависимостей, определение поправочных коэффициентов математической модели в ходе решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности. Оценка погрешности.

Подготовка 2-го материала – эксплуатация в течение 1 года в изменяющихся климатических условиях, нагрев до комнатной температуры, зачернение. Проведение серии экспериментов с использованием установки лазер-тепловизор-ноутбук-СПО. Получение и запись термограмм на стадиях нагрева-остывание.

Шаг 3. Определение основных ТФП – (температуропроводности и теплопроводности) материала до и после интенсивной эксплуатации – определение вида температурной зависимости.

Шаг 4. Сравнение теплофизических параметров эталонного и диагностируемого материала, оценка соответствия параметров и выхода за поля допуска.

Шаг 5. Применение методики прогнозирования изменений ТФП при продолжительной эксплуатации на основе тепловизионного диагностирования, оценка соответствия прогноза выхода параметров за поля допуска.

2. Порядок проведения эксперимента

Методика тепловизионного контроля силовых конструкций БпЛА, реализующая описанный способ, включает выполнение четырех основных этапов. Рассмотрим порядок ее использования на примере задачи поиска дефектов в конструкции БпЛА «Гранат». Измерения проводились с использованием двух автоматизированных устройств технического контроля, внешний вид которых представлен на рис. 1.

На первом этапе с помощью устройства технического контроля осуществлялся общий визуальный тепловой контроль силовых конструкций БпЛА до начала его эксплуатации. Время измерения и обработки данных составило около двух минут.

На втором этапе с помощью устройства технического контроля осуществлялось более точное измерение коэффициента эффективной теплопроводности наиболее критичных элементов конструкции БпЛА в шести точках.

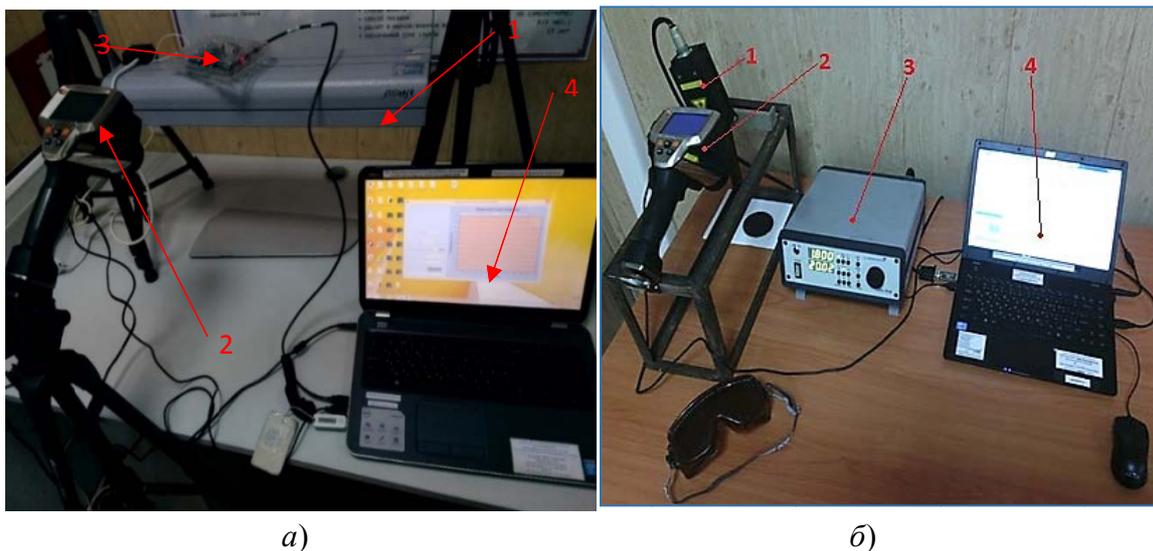


Рис. 1. Внешний вид УТК:

- а* – устройство визуального теплового контроля (1 – инфракрасная лампа, 2 – тепловизор;
 3 – микроконтроллер Arduino; 4 – персональный компьютер (ноутбук);
б – устройство технического контроля для точечного определения ТФП
 (1 – лазерная головка, 2 – устройство видеозаписи (тепловизор);
 3 – блок питания и термостабилизации лазерных диодов LDD-10N;
 4 – персональный компьютер (ноутбук)

На третьем и четвертом этапах осуществлялся контроль состояния того же БпЛА после 30 циклов «взлет-посадка» (рис. 2) аналогично тому, как это проводилось на первом и втором этапах перед началом его эксплуатации. При непосредственном визуальном осмотре (рис. 2, *а*) повреждения не обнаруживаются, однако при тепловом контроле в двух областях (аномальных зонах) наблюдаются заметные отличия полученной термограммы (рис. 2, *б*) от «эталонной» – до начала эксплуатации.

В ходе точечного контроля осуществлялось измерение в потенциально дефектных областях (рис. 2, *б*). Для каждой из двух аномальных зон проведено по 8 контрольных измерений – по 4 измерения в обнаруженных на третьем этапе контроля дефектных зонах и по 4 измерения вне их границ.

Из полученных результатов следует, что технологические и эксплуатационные дефекты, практически не обнаруживаемые с использованием средств общего теплового контроля, тем не менее могут быть локализованы по результатам оценивания интегральных коэффициентов теплопроводности с использованием описанной методики. Предложенная методика контроля состояния силовых конструкций, по сравнению с другими, характеризуется более высокой оперативностью вследствие повышенной производительности диагностических операций. Дополнительным преимуществом является отсутствие необходимости демонтажа конструкции объекта измерений. Отметим, что оценка

погрешности измерений [3], выполненных по предложенной методике показала, что значение среднеквадратического отклонения теплопроводности на поверхности КМ БпЛА не превышала 4,6%.

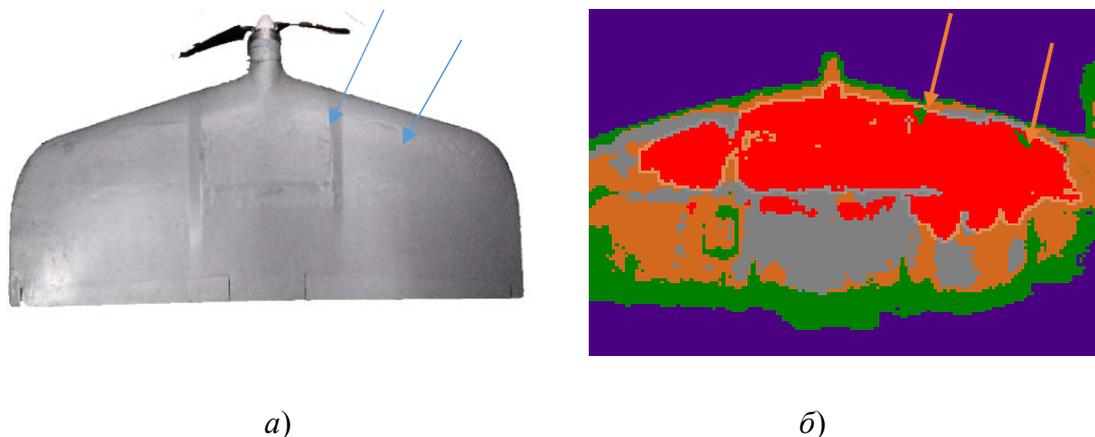


Рис. 2. Внешний вид (а) и термограмма (б) БпЛА «Гранат» при наличии дефектов и повреждений

3. Выводы

Таким образом, в статье представлена постановка и приведено алгоритмическое решение обратной и прямой задачи расчета теплофизических параметров по термограммам поверхностей силовых конструкций из КМ. Использование теплофизических параметров композиционных материалов позволяет в дальнейшем определять наличие дефектов и повреждений в конструкциях из композиционного материала на начальном этапе и в процессе эксплуатации БпЛА.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту РФФИ 18-08-00053.

Список использованных источников

1. Information support of methods and means of non-destructive thermal control of heat-shielding properties of samples / A. A. Churikov, Y. Y. Gromov, S. A. Barkalov, O. N. Morozova, I. N. Ishchuk // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 2017. – № 10(2). – P. 65 – 74.
2. Information support of finding a solution the problem of hidden objects / Journal of Theoretical and Applied Information Technology / Y. Y. Gromov, V. V. Alekseev, V. E. Didrikh et al. – 2017. – № 95(3). – P. 615 – 620.

И. Н. Ищук¹, С. Н. Глинчиков¹, М. А. Лихачев¹, В. Н. Тяпкин²

(¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и
Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия;

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия)

РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ТЕРМОГРАММАМ ПОВЕРХНОСТИ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Рассмотрена математическая модель нагрева и охлаждения композиционных материалов (КМ), алгоритм расчета теплофизических параметров (ТФП) по термограммам поверхностей силовых конструкций из КМ. Представлены методы определения ТФП твердых материалов при использовании одноимпульсного источника тепла в соответствии с видами определяемых параметров. Определены требования к диагностическому признаку по определению ТФП технического состояния силовых конструкций беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

I. N. Ischuk¹, S. N. Glinchikov¹, M. A. Likhachev¹, V. N. Tyapkin²

(¹Military Training and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy
named after Professor N. Ye. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina”, Voronezh, Russia;

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia)

CALCULATION OF THERMOPHYSICAL PARAMETERS BY THERMOGRAMS OF SURFACE OF POWER STRUCTURES FROM COMPOSITE MATERIALS

Abstract. A mathematical model of heating and cooling composite materials (CM), an algorithm for calculating thermophysical parameters (TFP) from thermograms of the surfaces of power structures made of CM are considered. Methods for determining the DFT of solid materials using a single-pulse heat source in accordance with the types of determined parameters are presented. The requirements to the diagnostic feature for determining the DFT of the technical condition of the power structures of unmanned aerial vehicles (UAVs) are determined.

Введение. По мере увеличения доли композитов в конструкции находящихся в эксплуатации БПЛА все большую важность приобретает задача дистанционного обнаружения повреждений в композиционных элементах силовых несущих конструкций БЛА, где наиболее частой причиной появления дефектов является ударное воздействие, а не износ в процессе эксплуатации.

Особенностью композиционных материалов является то, что они имеют сложную многокомпонентную структуру и представляют собой комбинацию из

нескольких материалов, обладающих различными теплофизическими параметрами. Эти параметры характеризуются признаками, устанавливаемыми нормативно-технической документацией на материалы и конструкции, и их определение проводится с помощью специальных методов и устройств. В связи с этим при разработке и создании устройства технического контроля ТФП композиционных материалов основной задачей является разработка информационного обеспечения как комплекса аппаратных и метрологических средств, математического и программного обеспечения [1 – 3].

В настоящее время особое место в исследовании ТФП материалов занимают тепловые методы неразрушающего контроля, в основе которых лежит мгновенное или импульсное тепловое воздействие на исследуемый объект. Преимуществами методов являются их высокая оперативность, широкие функциональные возможности, а также возможность проведения исследования без нанесения повреждений исследуемому объекту.

Перспективным подходом к решению задачи определения ТФП углепластиковых композиционных материалов в процессе эксплуатации является применение математического аппарата решения обратной задачи теплопроводности и разработка устройства технического контроля на их основе.

Определение теплофизических параметров КМ зачастую невозможно без применения численных методов, причем точность расчетов пропорциональна количеству итераций. Это обстоятельство также является важным аргументом в пользу применения устройств технического контроля для определения ТФП композиционных материалов.

1. Постановка задачи. Для проведения исследований ТФП удобно работать с температурным распределением, близким к температурному полю неограниченной пластины.

Создается такое температурное распределение путем одностороннего нагрева образца плоской формы, обеспечивая тепловую изоляцию противоположной нагревателю стороны образца. При решении обратной задачи теплопроводности удобно в качестве входных данных для расчета использовать значения тепловых потоков на поверхностях исследуемого образца.

Таким образом, обобщая приведенные выше рекомендации, построим математическую модель, описывающую процесс нагрева КМ, аналогичную модели неограниченной пластины

$$\begin{aligned}
 C(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \\
 T &= T(x, \tau), \quad 0 < \tau \leq t_3, \\
 T(x, 0) &= f_0(x), \\
 -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= Q(\tau)_{laser} = const, \quad 0 < \tau \leq t_3
 \end{aligned}$$

где C – объемная теплоемкость; f_0 – начальное температурное распределение; Q_{laser} – величина теплового потока; t_3 – продолжительность эксперимента; x – пространственная координата.

Используя допущения:

- 1) температура в любой точке образца не зависит от времени, т.е. имеет место стационарный тепловой режим;
- 2) КТ материала не зависит от температуры ($\lambda = \text{const}$);
- 3) отсутствуют утечки тепла с боковой поверхности;
- 4) нет внутренних источников или стоков тепла.

Постановка задачи

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0. \quad x = 0, \quad Q = -\lambda \frac{dT}{dx} F,$$
$$x = \delta, \quad T = T_\delta.$$

Решение прямой задачи:

$$T(x) = T_\delta + \frac{Q}{\lambda F} (\delta - x).$$

Решение обратной задачи:

$$\lambda = \frac{Q(x_2 - x_1)}{[T(x_1) - T(x_2)]F}.$$

2. Методы решения и исходные данные

Математические модели способов измерений формируются из сочетаний трех пар переменных: расстояния $\{x_1, x_2\}$, времени $\{\tau_1, \tau_2\}$, энергии (количества тепла выделяемого источником тепла) $\{Q_1, Q_2\}$ [2].

В соответствии с видами определяемых параметров известны следующие импульсные методы определения ТФП твердых материалов при использовании одноимпульсного источника тепла:

1. Определение максимальных значений температур [1].
2. Метод наперед заданного отношения температур [2].
3. Определение дифференциальных значений температур [3].
4. Определение интегральных значений температур [4].

Исходя из проведенного анализа по определению ТФП композиционных материалов, применительно к силовым конструкциям БПЛА необходимо учесть следующие требования, предъявляемые к диагностическому признаку [5]:

1. Диагностический признак (ДП) должен соответствовать изменчивости и реагировать на возможные состояния, определяемые нормативно-технической документацией. При оценке состояния силовых конструкций из КМ наибольший интерес, с точки зрения эксплуатации, представляет отсутствие дефектов, поэтому диагностический признак должен отражать «бездефектность» изделия.

2. ДП должен быть критичен по отношению к каждому из контролируемых диагностических параметров. Изменение уровня состояния силовых конструкций БпЛА должно характеризоваться изменением величины хотя бы одного из диагностических параметров контроля.

3. Диагностический параметр должен иметь физический смысл, быть связанными функционально с физическими параметрами и иметь количественную оценку.

4. Информационный критерий – однозначно отражать степень изменчивости состояния силовых конструкций и проявление дефекта по контролируемому диагностическому параметру.

5. Характер изменения ДП в процессе эксплуатации БпЛА – быть необратимым. Это может позволить прогнозировать сроки очередного контроля и прекращения эксплуатации БпЛА.

6. ДП должен позволять оценивать состояние силовых конструкций БпЛА применительно к используемым средствам и методам контроля. В качестве критерия эффективности целесообразно использовать информативность диагностического контроля.

7. ДП должен характеризовать уровень состояния несущих конструкций БпЛА на всех этапах их эксплуатации.

Задавшись допусковым значением частных параметров можно определить предельно допустимый уровень работоспособности как критический класс состояний. И, наконец, ДП должен отражать переход диагностируемого объекта от одного класса состояний к другому вплоть до критического – разрушение силовой конструкции БпЛА.

3. Выводы. Таким образом, с учетом высоких требований к автоматизации и технологичности контроля и диагностики силовых конструкций БпЛА из КМ определен тепловой метод, позволяющий проводить автоматизированный тепловизионный, неразрушающий конструкцию контроль эксплуатационных повреждений изделий из КМ.

Определены требования к диагностическому признаку технического состояния силовых конструкций беспилотных летательных аппаратов.

Рассмотрены способы определения ТФП материалов как надежный инструмент технического обеспечения безаварийной эксплуатации БпЛА методом оперативного неразрушающего контроля для определения физико-механических и теплофизических параметров композиционных материалов (с требуемой точностью). Следует переходить к определению основных этапов экспериментальной апробации – по новой методике с оценкой соответствия прогноза выхода параметров за поля допуска для последующего их практического применения.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту РФФИ 18-08-00053.

Список использованных источников

1. Ищук И. Н. Фесенко А. И. Тепловой неразрушающий контроль теплофизических свойств материалов на основе многофакторных функций преобразования / И. Н. Ищук, А. И. Фесенко // Измерительная техника. – 2005. – № 7. – С. 44 – 46.

2. Ищук, И. Н. Идентификация теплофизических свойств материалов на основе использования вариационных методов исчисления / И. Н. Ищук // Измерительная техника. – 2007. – № 7. – С. 34 – 36.

3. Пат. 2184953 Российская Федерация, МКИ5 G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов; заявитель и патентообладатель Тамбовское ВВАИУРЭ (ВИ) / Ищук И. Н., Фесенко Т. А., Обухов В. В. – № 2000119082/28; заявл. 18.07.00; опубл. 10.07.02, Бюл. № 19.

4. Пат. 2255329 Российская Федерация, МКИ5 G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических свойств материалов; заявитель и патентообладатель Тамбовское ВВАИУРЭ (ВИ) / Ищук И. Н., Чудинов Ю. В., Фесенко А. И. – № 2003136982/28; заявл. 22.12.03; опубл. 27.06.05, Бюл. № 18.

5. Пат. 2284030 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 25/18. Способ определения комплекса теплофизических свойств твердых материалов; заявитель и патентообладатель ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева» / Ищук И. Н., Фесенко А. И., Обухов В. В., Чудинов Ю. В., Обухова Л. В. – № 2004109778/28 ; заявл. 30.03.04 ; опубл. 20.09.06, Бюл.

А. Ш. Шихвердиева, Е. А. Максимова,
(Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия)

УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Аннотация. Возможность использования для обеспечения информационной безопасности КИИ PDCA-модели, в которой, на шаге проверки и мониторинга, предлагается концепция безопасного многоагентного информационного взаимодействия для сбора информации с объектов КИИ.

Sh. Shikhverdieva, E. A. Maksimova,
(Volgograd State University, Volgograd, Russia)

MANAGEMENT OF OPERATION OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE'S OBJECTS

Abstract. The possibility of using PDCA-model for the information security of CII, in which at the verification and monitoring step the concept of safe multi-agent information interaction for collecting information from CII objects is proposed.

В Российской Федерации о критической информационной инфраструктуре (КИИ) заговорили в 2017 году, после утверждения Федерального закона от 26.07.2017 № 187-ФЗ [1]. В сравнении с мировым опытом, Россия несколько отстала в данном вопросе [2]. Американская президентская директива PDD-63 в мае 1998 года учредила национальную программу «Защита критической инфраструктуры» [3]. В то время как Россия занялась данным вопросом в теории, большинство стран Европы уже активно занимаются защитой КИИ [4].

В России формируется свой подход к решению данной проблемы. Согласно российскому законодательству критическая информационная инфраструктура – «объекты критической информационной инфраструктуры, а также сети электросвязи, используемые для организации взаимодействия таких объектов» [1]. В данном случае под объектами КИИ понимаются информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети, автоматизированные системы управления субъектов КИИ [1].

Для понимания сферы применения законодательства в области КИИ необходимо четко определить субъекты КИИ, под которыми понимаются «государственные органы, государственные учреждения, российские юридические лица и (или) индивидуальные предприниматели, которым на праве собственности, аренды или на ином законном основании принадлежат информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети, автоматизированные системы управления, функционирующие в сфере здравоохранения, науки, транспорта, связи, энергетики, банковской сфере и иных сферах финансового рынка, топливно-энергетического комплекса, в области атомной энергии, оборонной, ракетно-космической, горнодобывающей, металлургической и химической промышленности, российские юридические лица и (или) индивидуальные предприниматели, которые обеспечивают взаимодействие указанных систем или сетей» [1].

Основная цель законодательства в области КИИ в России, как и во всем мире, это обеспечение безопасности [1]. Для выполнения требований законодательства организациям, субъектам КИИ, необходимо выполнить следующие задачи: создать комиссию по категорированию, определить объекты КИИ, согласовать перечень объектов КИИ с регулятором в установленной сфере, отправить перечень в ФСТЭК России, в течение года с момента согласования осуществить категорирование объектов КИИ, результаты зафиксировать в акте, направить в ФСТЭК России, а также субъект КИИ должен создать систему безопасности значимых объектов КИИ. В соответствии с категорией значимости объекта КИИ, необходимо реализовывать меры защиты для каждого значимого объекта КИИ в соответствии с приказом ФСТЭК России № 239 от 25.12.2017 [5].

Систему управления информационной безопасностью (СУИБ) КИИ возможно построить на базе PDCA-модели [6]. PDCA-модель предлагает цикл из

четырёх шагов: разработка СУИБ, внедрение СУИБ, проверка и мониторинг СУИБ, поддержка и улучшение СУИБ.

В ходе реализации PDCA-модели выполняются мониторинговые процедуры. В целях сбора информации для оценки и повышения уровня безопасности КИИ предлагается концепция безопасного многоагентного информационного взаимодействия.

Предполагается, что сбор информации с объектов КИИ будет осуществляться при помощи агентов [7]. При многоагентном информационном взаимодействии существует необходимость в организации защиты обмена информацией между агентами и ее последующей передачи для анализа. Оценка безопасного многоагентного информационного взаимодействия реализована в графовой модели, где вершины графа – это агенты, которые отвечают за объекты КИИ, а ребра графа линии связи между агентами для передачи и обмена информацией.

Согласно предлагаемой концепции защиты обмена информацией между агентами, вводится понятие «атрибут безопасности». Под атрибутами безопасности понимаются элементы защиты соединений между взаимодействующими агентами. Количественная характеристика атрибутов безопасности – веса ребер графа, представляющего схему взаимодействия агентов (рис. 1).

Выделим следующие атрибуты безопасности, связанные с использованием: алгоритма шифрования – S, алгоритма хэширования – H, алгоритма электронной подписи (ЭП) – ES, скорости соединения – V, проводной сети – P, беспроводной сети – BP.

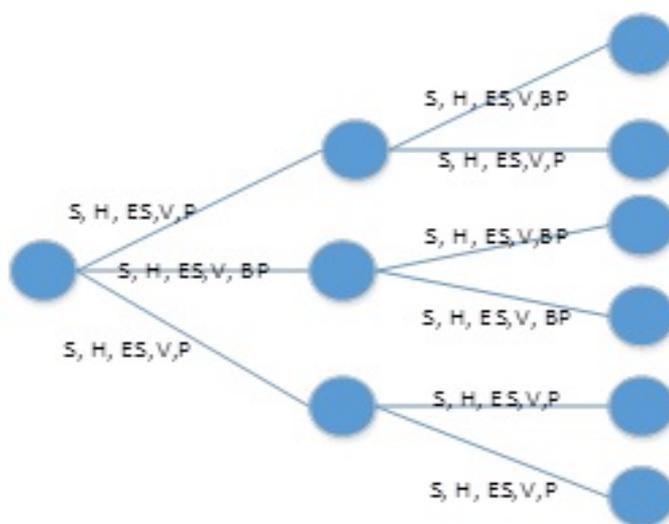


Рис. 1. Обобщенная схема взаимодействия агентов

В Российской Федерации, в КИИ, следует применять алгоритмы шифрования, хэширования, электронной подписи в соответствии с российскими стандартами [8 – 10].

Разработана функциональная модель в виде диаграмм IDEF0 (рис. 2, 3), программная реализация которой позволяет отследить использование наиболее эффективных атрибутов безопасности и получить рекомендации по повышению безопасности многоагентного информационного взаимодействия. Подразумевается имитация многоагентного информационного взаимодействия на предложенной графовой модели, где вершины – это агенты, а ребра графа – линии связи между агентами, где устанавливаются веса ребер графа – атрибуты безопасности, которые необходимо проанализировать.

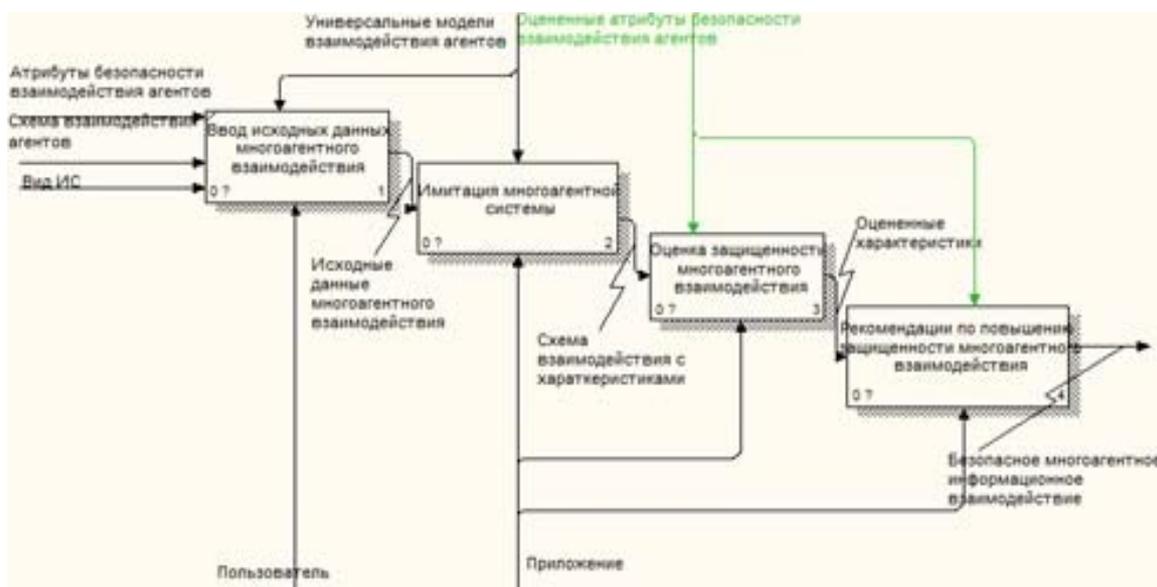


Рис. 2. Функциональная модель реализации контроля безопасного многоагентного информационного взаимодействия

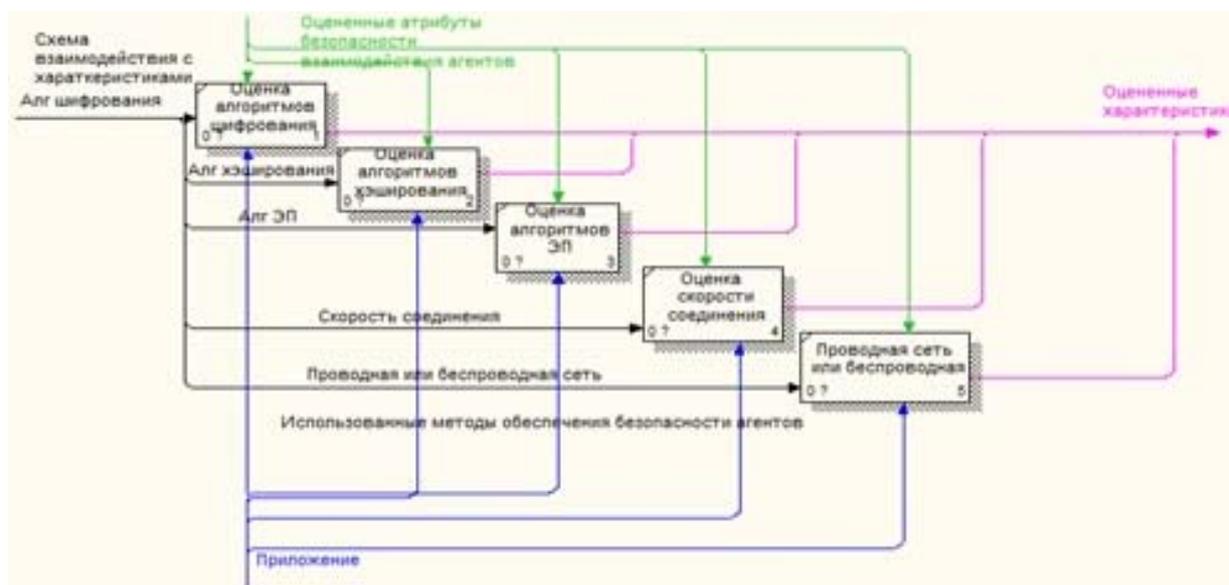


Рис. 3. Декомпозиция блока «Оценка защищенности многоагентного взаимодействия»

По функциональной модели и PDCA-модели разработана формализованная модель управления ИБ КИИ, где функция управления ИБ КИИ:

$$F = F(Dev, Imp, Ch, Sup), \quad (1)$$

где Dev – разработка СУИБ; Imp – внедрение СУИБ; Sp – проверка и мониторинг СУИБ; Sup – поддержка и улучшение СУИБ.

$$Ch = Ch(\{Ag\}, \{SecAt\}), \quad (2),$$

где Ag – множество агентов; SecAt – множество атрибутов безопасности.

$$SecAt = \{S, H, ES, V, P, BP\}, \quad (3)$$

где S – алгоритм шифрования; H – алгоритм хэширования; ES – алгоритм электронной подписи; V – скорость соединения; P – проводная сеть; BP – беспроводная сеть.

Предложенная модель может служить концептуальной основой для системы управления ИБ КИИ и базовой моделью для разработки средств управления инцидентами информационной безопасности на всех этапах жизненного цикла субъектов КИИ. Учет при этом принципов взаимозависимости, взаимодействия, взаимосвязи, непрерывности, интерактивности его элементов позволит повысить уровень защищенности КИИ в целом.

Список использованных источников

1. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : Федеральный закон от 26.07.2017 N 187-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/.
2. Critical Information Infrastructure [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://publicwik-01.fraunhofer.de/CIPedia/index.php/Critical_Information_Infrastructure#cite_note
3. Presidential directive PDD-63 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://fas.org/irp/offdocs/pdd/pdd-63.htm>.
4. Директива Совета Европейского Союза 2008/114/ЕС от 8 декабря 2008 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://base.garant.ru/70333008/>.
5. Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : Приказ ФСТЭК от 25 декабря 2017 г. № 239 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://fstec.ru/en/53-normotvorcheskaya/akty/prikazy/1592-prikaz-fstek-rossii-ot-25-dekabrya-2017-g-n-239>.
6. Международный стандарт ISO/IEC 27001. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-mek-27001-2013\(rus\).pdf](https://pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-mek-27001-2013(rus).pdf).

7. ИНТУИТ. Управление на базе мультиагентных систем. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.intuit.ru/studies/courses/13858/1255/lecture/23976?page=2>.

8. ГОСТ Р 34.12–2015. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://tc26.ru/standard/gost/GOST_R_3412-2015.pdf.

9. ГОСТ Р 34.11–2012. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Функция хэширования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikisource.org/wiki/ГОСТ_Р_34.11—2012.

10. ГОСТ Р 34.10–2012. ГОСТ Р 34.10–2012. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Процессы формирования и проверки электронной цифровой подписи [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=180151>.

С. О. Цветков¹, В. В. Алексеев², А. П. Худяков², Е. В. Емельянов³

(¹Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), Тамбов, Россия;
²Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия;
³ФЦ НИВТ «СНПО «Элерон»», Россия)

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НЕГАТИВНЫХ ФАКТОРОВ

Аннотация. Рассматриваются проблемы повышения эффективности и устойчивости применения технических систем в условиях воздействий негативных факторов.

S. O. Tsvetkov¹, V. V. Alekseev², A. P. Hudyakov², E. V. Emelyanov³

(¹Interspecific Center for the Training and Combat use of Electronic Warfare Troops (Training and Testing), Tambov, Russia;
²Tambov State Technical University, Tambov, Russia;
³FC NIVT “SRPA “Aileron”, Russia)

ANALYSIS OF APPROACHES TO INCREASE EFFICIENCY OF APPLICATION OF TECHNICAL SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF INFLUENCE OF NEGATIVE FACTORS

Abstract. The article deals with the problems of increasing the efficiency and sustainability of the use of technical systems under the influence of negative factors.

Современные информационные системы (ИС) по своей структурной сложности, сложности функционирования, выбора поведения и развития относятся к классу сложных систем и в задачах повышения эффективности подлежат исследованию методами системного анализа.

Системный подход к решению сложных проблем предполагает необходимость целостного учета всех существенных для этих проблем факторов. В первую очередь, это касается влияния мировых тенденций в динамике развития общественно значимых технологий.

Составляющими элементами ИС как среды кроме компьютеров, сетей, программных продуктов, баз данных и других технических элементов являются люди, целенаправленно воздействующие на объекты с учетом их отраслевых особенностей в процессе управления и принятия решений.

В статье в качестве инициативы методологического характера предлагается расширение понятийного аппарата описания проблемы повышения эффективности, в том числе состава и структуры частных критериев, и обоснование требований к вариантам формализации комплексного критерия эффективности ИС как технической системы и как средства анализа и обработки информации с позиций высоких гуманитарных технологий общения.

Информационные системы, безусловно, относятся к классу технических систем (ТС). Поэтому обсуждение всех аспектов, касающихся ИС, должно базироваться на общепринятых подходах, принятых для анализа технических систем. Технические системы играют огромную все возрастающую роль во всех сферах жизни человечества. Поэтому оно заинтересовано в развитии систем данного класса, в повышении их эффективности. Решение этой проблемы будет более успешным, если фигурируемые в ней основные понятия, которые в настоящий момент не отличаются однозначностью, получают современное комплексное толкование.

С учетом данных недостатков представляет интерес определение понятия эффективности в широком и узком смыслах [1].

Эффективность в широком смысле слова – комплексная характеристика потенциальных и (или) реальных результатов (интегрального эффекта) использования системы с учетом степени соответствия этих результатов главным целям, показателей всех видов ресурсопотребления, а также других видов количественных и качественных показателей, выявленных методами системного анализа.

Проблема эффективности связана с тремя основными задачами, которые также являются основными видами задач обобщенного системного анализа и системотехники:

- а) задачей анализа эффективности функционирования реальной системы;
- б) задачей выбора из некоторого конечного явно представленного множества вариантов системы варианта, обладающего наибольшей потенциальной эффективностью (оптимального варианта);

в) задачей системного и структурного синтеза, удовлетворяющего тем или другим требованиям эффективности (оптимальности).

Эффективность в узком смысле слова может быть определена путем декомпозиции понятия эффективности в широком смысле по ряду направлений, например, применительно к техническим системам.

Техническая (внутренняя функциональная) эффективность. Это комплексная характеристика технических возможностей и приспособленности системы к эксплуатации в различных условиях, а также ее экологичности. Она определяется широким набором различного рода показателей, которые можно разбить на три группы: качества функционирования, технико-эксплуатационные, эргономические.

Экономическая эффективность является одной из важнейших форм проявления общественной, народно-хозяйственной эффективности. Универсальность применения категории экономической эффективности в народном хозяйстве проявляется прежде всего в том, что она позволяет использовать единую стоимостную меру для сравнительной оценки затрат и получаемого результата (эффекта), отнесенных к тем или иным временным интервалам.

Эффективность управления. Современные большие технические системы, как правило, включают автоматическую или автоматизированную систему управления. В связи с этим рассмотрение проблемы эффективности в широком смысле, так же как и всех указанных выше частных видов эффективности, должно вестись с учетом влияния на них управления. Более того, эффективность управления в силу его значимости должна рассматриваться как самостоятельный частный вид эффективности.

Технические системы как отдельный многочисленный класс сложных систем имеет свою полисемию, влияющую на результаты этого процесса и поэтому нуждающуюся в обсуждении.

Неполнота толкования обсуждаемого важнейшего для техники понятия в приведенных выше определениях заключается в упущении роли человеческого фактора, без которого существование ТС теряет смысл, преодолевается в следующем определении [2]: техническая система – это материальная, неживая функционально-ориентированная система, которая входит в качестве элемента в надсистемную структуру и используется и/или развивается на основе мыслительных образов человека или сообщества.

Все вышеизложенное нуждается в полном и емком обобщении, вариант которого предлагается автором: техническая система – искусственно созданная совокупность упорядоченных взаимодействующих элементов, обладающая синергетическим эффектом и созданная на основе моделей для удовлетворения определенных потребностей человека.

В настоящее время трудно себе представить ТС без компьютерного управления на основе отдельных вычислителей и информационных систем.

При этом информационные системы имеют и приобретают все более широкое применение, расширяя рамки традиционного использования технических систем и захватывая область систем поддержки принятия решений.

Создание современных электронных вычислительных машин позволило автоматизировать обработку данных во многих сферах человеческой деятельности. Без современных систем обработки данных трудно представить сегодня передовые производственные технологии, технические системы военного назначения, управление социально-экономической сферой на всех ее уровнях, научные исследования, образование и другое.

Одним из наиболее распространенных классов систем обработки данных являются информационные системы. Для серьезного обсуждения технологий современных информационных систем необходимо более четко определить, в чем заключаются их специфические особенности, чем они отличаются от других систем обработки данных, какие функции они могут выполнять, какими ресурсами они располагают.

Важный факт состоит в том, что единого устоявшегося и общепринятого определения понятия «информационная система» в настоящее время не существует, да и вряд ли оно может существовать. Дело в том, что в зависимости от необходимости в разных случаях используются разные точки зрения на такой сложный продукт высоких технологий, каким являются современные информационные системы.

Требования к характеристикам, ранее считавшимся понятиями второго порядка, изменились и приняли форму достаточно жестких ограничений. В результате, при обосновании направлений повышения эффективности технических систем поддержки приложений стали использовать более сложный подход к решению задач многокритериальной оптимизации, когда прочие критерии должны поддерживаться на уровне не хуже тех показателей, которые были достигнуты в предыдущем периоде. Это потребовало применения аппарата линейного программирования в задачах данного класса. При этом доминирующим критерием стала производительность ЭВМ, которая является более сложной характеристикой при ее количественном оценивании.

Задача многокритериальной оптимизации на втором этапе преобразуется следующим образом [3]: главный критерий (производительность – $f_1(x)$) максимизируется, а на остальные (показатели надежности и др.) накладываются ограничения на их допустимые значения, т.е.

$$\begin{aligned} f_1(x) \max_{x \in G} f_2(x) &> C_2, \\ f_3(x) &> C_3, \\ f_m(x) &> C_m, \end{aligned}$$

где C_2, \dots, C_m – те значения эксплуатационных показателей, которые, например, были достигнуты на прошлом этапе.

Востребованная устойчивость обработки приложений привела к необходимости введения и измерения новых форм производительности: в условиях действия помех – помехоустойчивости и в условиях отказов – отказоустойчивости (живучести). При этом особую роль начинают играть такие характеристики, как время восстановления вычислительного процесса и остаточная производительность, необходимая для поддержания усеченного режима работы в диагностических целях и/или режима безопасного останова. Данная группа показателей может быть объективно оценена с достаточной точностью, но при весьма значительных затратах на разработку адекватной процедуры методами системного анализа и проведения большого числа вычислительных экспериментов методом имитационного моделирования. Это вступает в гносеологическое противоречие с существом процедуры комплексирования всех частных критериев, тесно связанной с человеческим фактором в отношении моделей индивидуальных и коллективных предпочтений, формирующих возможность интеллектуальной обработки данных в ИС.

Наибольшее распространение в методах разрешения данного противоречия получили линейные свертки, в том числе, построенные с использованием взвешенных коэффициентов [4]. В последнем случае для критериев:

$$\max_{x \in G} \sum_{k=1}^n g_k(x) g_k(x)$$

составляется линейная свертка

$$f_l = \sum_{k=1}^n f_{1k} g_k(x),$$

где $A, k > 0$; $k = 1, f_{1k} = 1$ – весовые коэффициенты относительной значимости локальных критериев.

Данный подход при сравнительной трудоемкости достаточно гибок, поскольку позволяет варьировать важностью каждого локального критерия и тем самым реализовать интеллектуальную обработку данных.

В статье показано, что при всей простоте и наглядности линейной свертки этим инструментом можно создавать лишь достаточно простые модели предпочтений, отличающиеся неизменностью свойств во всей области определения, в то время как реальные предпочтения могут изменяться при переходе из одной подобласти в другую подобласть области определения.

Выдвинутые в дискуссионном плане предложения по расширению понятийного аппарата и развитию механизмов комплексного оценивания эффективности ТС могут быть использованы при разработке новых подходов к созданию интеллектуальных технологий повышения эффективности информационных систем.

Список использованных источников

1. Каган, Б. М. Основы эксплуатации ЭВМ : учеб. пособие для вузов / Б. М. Каган, И. Б. Мкртумян ; под ред. Б. М. Кагана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 432 с.: ил.

2. Лагоша, Б. А. Курс лекций по программе кандидатского минимума по специальности 08.00.13 «Экономико-математические методы» : пособие для аспирантов и соискателей / Б. А. Лагоша ; Московский государственный университет экономики, статистики и информатики. – М., 1999. – 160 с.

3. Резников, Б. А. Системный анализ и методы системотехники. Ч. 1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем / Б. А. Резников. – М. : МО СССР, 1990. – 522 с.

5. Рубин, М. С. Этюды о законах развития техники / М. С. Рубин. – 2006. URL : <http://www.temm.ru/ru/section.php?docId=3432>

А. О. Уланов, Х. Л. М. Маджед

(Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия)

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Рассматривается актуальность решения задач надежного функционирования информационных систем. Понятие информационной системы. Вероятностная теория и теория нечетких множеств в оценке надежности функционирования информационных систем.

A. O. Ulanov, H. L. M. Majed

(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

APPROACHES TO ASSESSING THE RELIABILITY OF INFORMATION SYSTEMS

Abstract. Relevance of solving problems of reliable functioning of information systems. The concept of information system. Probabilistic theory and fuzzy set theory in the evaluation of the reliability of information systems.

Несмотря на интенсивное развитие средств обнаружения угроз безопасности функционирования компьютерных сетей задача обеспечения надежности функционирования информационных систем (ИС) до сих пор стоит очень остро. Данное обстоятельство связано с влиянием на систему негативных внешних воздействий (НВВ) различной природы; ростом объемов данных, хранящихся и обрабатываемых в системе; возможными ограничениями аппаратных средств,

выделяемых на создание и развертывание ИС; ограничениями пропускной способности каналов передачи данных и других характеристик сети. Поэтому решение задач надежного и бесперебойного функционирования ИС является основой для эффективного развития производства, сферы финансового и государственного управления, развития бизнеса и оказания услуг, а также других граней жизнедеятельности человека.

Для реализации мероприятий по обеспечению надежности функционирования информационных систем необходимо учитывать, что каждая ИС имеет свои характерные особенности. Современное понятие ИС имеет достаточно широкую трактовку. В соответствии с Федеральным законом РФ от 27.06.2016 г. №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» информационная система – «совокупность содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих ее обработку информационных технологий и технических средств» [1]. Международный стандарт ISO/IEC 2382:2015 трактует понятие ИС как системы обработки информации, работающей совместно с организационными ресурсами, такими как люди, технические средства и финансовые ресурсы, которые обеспечивают и распределяют информацию [2]. Российский ГОСТ Р 50.1.056–2005 понимает под информационной системой автоматизированную систему, результатом функционирования которой является представление выходной информации для последующего использования [3]. Таким образом, процесс эффективного функционирования ИС зависит от вида и количества компонентов, составляющих ИС (технических, программных, эргатических и др.), а также от условий эксплуатации, в которых данная ИС функционирует.

Согласно ГОСТ 24.701–86 под надежностью ИС, как автоматизированной системы управления, понимается «Свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способности системы выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации» [4].

Надежность ИС оценивают, как на этапе проектирования (проектная/априорная оценка), так и в период эксплуатации информационной системы (экспериментальная/апостериорная оценка).

В первом случае оценка необходима для проверки заданных параметров уровня надежности разрабатываемой системы.

Во втором случае необходимо оценить фактически достигнутый уровень надежности при функционировании информационной системы в процессе эксплуатации.

Существуют различные методы оценки надежности ИС на стадии проектирования, основными являются:

- аналитические;
- вероятностного моделирования;
- экспертные.

Оценка результирующего влияния на уровень надежности всех компонентов системы с учетом воздействия внешней среды, режимов функционирования ИС, а также параметров технической эксплуатации проводится при помощи эксперимента.

При проведении экспериментальной оценки надежности ИС используются инструменты:

- специальные испытания на надежность;
- сбор, обработка и анализ статистических данных, полученных в процессе функционирования ИС;
- расчетно-экспериментальные методы.

На выбор методов проектной и экспериментальной оценок надежности ИС влияет особенность разрабатываемой ИС и тех условий, в которых она функционирует. На разных стадиях разработки и эксплуатации применяются различные инженерные методики, алгоритмы и программы решения задач оценки уровня надежности.

Современная теория надежности сложных систем располагает широким арсеналом моделей, построенных на базе вероятностной теории.

В соответствии с определением надежность является сложным свойством. Именно благодаря надежности система выполняет определенные функции в течение некоторого срока с заданным качеством. Основными показателями являются: безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость [5, 6].

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что время работы объекта до отказа окажется большего или равно заданному времени t :

$$P(t) = P(\zeta \geq t) = 1 - F(t), \quad (1)$$

где ζ – случайное время работы до отказа или наработка на отказ; $F(t) = P(\zeta < t)$ – интегральная функция распределения случайной величины ζ ($\zeta < t$).

Средняя наработка до отказа:

$$T_{cp} = M_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t dP(t), \quad (2)$$

где T_{cp} – математическое ожидание времени работы до первого отказа.

Интенсивность отказов – отношение плотности вероятности к вероятности безотказной работы:

$$\lambda = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{dP(t)}{P(t)dt} = \frac{a(t)}{P(t)}, \quad (3)$$

где $a(t)$ – частота отказов.

Вероятность восстановления – вероятность того, что отказавший объект будет восстановлен в течение заданного времени t :

$$Q_g(t) = G(t), \quad (4)$$

где $G(t)$ – функция распределения времени восстановления.

Среднее время восстановления:

$$\hat{T}_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad (5)$$

где τ_i – время восстановления i -го отказа.

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса:

$$R_{CP} = \int_0^{\infty} r f(r) dt, \quad (6)$$

где r – ресурс информационной системы; $f(r)$ – плотности вероятности величины r .

Средний срок службы:

$$T_{cp.сл} = \int_0^{\infty} t_{сл} i f(t_{сл}) dt, \quad (7)$$

где $t_{сл} i$ – срок службы i -й информационной системы; $t_{сл}$ – плотность распределения срок службы.

Гамма-процентный срок службы – срок службы, в течение которого информационная система не достигает предельного состояния с заданной вероятностью:

$$T_{cp.\gamma} = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\gamma}{100}, \quad (8)$$

Средний срок сохраняемости:

$$T_{сохр.ср} = \int_0^{\infty} t_{сохр} i f(t_{сохр}) dt, \quad (9)$$

где $t_{сохр} i$ – сохраняемость i -й информационной системы; $f(t_{сохр})$ – плотность распределения величины $t_{сохр}$.

Коэффициент готовности – вероятность того, что в момент времени объект работоспособен:

$$K_{Г}(t) = \sum_{i \in S_p} P_i(t), \quad (10)$$

где S_p – множество работоспособных состояний объекта ($S_p \in S, S$ – множество всех состояний объекта); $P_i(t)$ – вероятность пребывания объекта в момент времени t в работоспособном состоянии i .

Коэффициент неготовности – вероятность того, что объект неработоспособен (находится на обслуживании) в произвольный достаточно удаленный от начала отсчета момент времени:

$$K_{НГ} = 1 - K_{Г}, \quad (11)$$

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект работоспособен в произвольный достаточно удаленный от начала отсчета момента времени и проработает безотказно в течение времени решения задачи τ_3 :

$$K_{ОГ}(\tau_3) = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{ОГ}(t, \tau_3) = \frac{1}{T_0 + T_{ПР}} \int_{\tau_3}^{\infty} P_1(t) dt, \quad (12)$$

где T_0 – начальный момент времени; $T_{ПР}$ – произвольный момент времени.

Коэффициент технического использования:

$$K_{ТИ} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i + \sum_{j=1}^k \tau_j}, \quad (13)$$

где $\sum_{i=1}^n t_i$ – суммарная наработка всех объектов; $\sum_{i=1}^m \tau_i$ – суммарное время простоев из-за плановых и внеплановых ремонтов всех объектов; $\sum_{j=1}^k \tau_j$ – суммарное время простоев из-за плановых и внеплановых технических обслуживаний всех объектов.

Применение вероятностных моделей на практике вызывает затруднение, основными причинами которого являются:

- поиск исходных данных для проведения расчетов, многие из которых доступны лишь производителю оборудования и в паспортных характеристиках на указываются;
- с течением времени в процессе эксплуатации исходные характеристики оборудования утрачивают свое первоначальное значение;
- неполнота исходных данных, которые учитывали бы реальные условия функционирования системы.

Действительно, установить в каких условиях будет функционировать ИС – задача труднодостижимая, а создание базы данных о надежности операций или элементов системы с учетом всех возможных условий их эксплуатации и вовсе невыполнимая. Поэтому полученные результаты экспериментов зачастую не соответствуют опыту эксплуатации в реальных условиях, когда система функционирует в условиях неопределенности. Таким образом, в строгих и достаточно сложных моделях вероятностной (классической) теории надежности зачастую используются далекие от реальности исходные данные, что в свою очередь негативно сказывается на объективности полученного результата.

Учитывая необходимость защиты ИС, их сложность и многокомпонентность, факторы неопределенности их функционирования возникает потребность в разработке новых подходов к оценке надежности функционирования современных ИС. В последние годы возник интерес к анализу надежности с помощью «нечеткой теории надежности», которая кроме традиционного вероятностного аппарата использует теорию нечетких множеств, хорошо приспособленную к учету лингвистической экспертной информации на базе естественно-языковых высказываний. Нечеткая теория надежности позволяет принимать решения оперируя значениями типа «очень высокая вероятность правильного выполнения» или «вероятность правильного выполнения операции находится в диапазоне 0.9-0.99»[7]; «если техника обслуживается правильно

и условия ее эксплуатации хорошие, то надежность высокая», или «если человек утомлен, то количество ошибок при выполнении операций увеличивается приблизительно вдвое» и т.д. Особенности математического аппарата теории нечетких множеств позволяют, с одной стороны, использовать имеющуюся неформализованную информацию для настройки модели при отсутствии обучающей выборки, а с другой стороны, без усложнения структуры модели учитывать нелинейный характер влияния различных факторов в задачах анализа надежности информационных систем. При создании нечеткой модели надежности для каждой подсистемы ИС необходимо определить лингвистические переменные, определить их функции принадлежности и создать базу нечетких решающих правил. Таким образом процесс оценки надежности функционирования и защиты ИС становится возможным на основе использования неопределенной исходной информации.

В работе рассматриваются подходы к оценке надежности ИС с использованием вероятностной теории надежности и посредством аппарата теории нечетких множеств.

Список использованных источников

1. Об информации, информационных технологиях и о защите информации : Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ (ред. от 18.12.2018).
2. ГОСТ 33707–2016 (ISO/IEC 2382:2015). Информационные технологии (ИТ). Словарь. – Введ. 2017-09-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 25 с.
3. ГОСТ Р 50.1.056–2005. Техническая защита информации. Основные термины и определения. – Введ. 2006-06-01. – М. : Изд-во стандартов, 2006. – 16 с.
4. ГОСТ 24.701–86. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения. – Взамен ГОСТ 24.701-83; введ. 1987-07-01. – М. : Стандартинформ, 2009. – 12 с.
5. Надежность информационных систем : учебное пособие / Ю. Ю. Громов, О. Г. Иванова, Н. Г. Мосягина, К. А. Набатов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 160 с.
6. Шубинский, И. Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. – М. : «Журнал Надежность», 2012. – 216 с.
7. Ротштейн, А. П. Нечеткая надежность алгоритмических процессов / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба. – Винница : Континент-ПРИМ, 1997. – 142 с.

И. Г. Рязанов, А. Н. Грибков

(Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия)

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЗАДАЧАХ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРИОДА ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ**

Аннотация. Рассмотрены основные подходы технической эксплуатации информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС), предложен способ модернизации существующих методов определения оптимального периода технического обслуживания (ТО) на основе применения нейросетевых технологий.

I. G. Ryazanov, A. N. Gribkov

(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

**APPLICATION OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES
IN TASKS OF DETERMINING THE OPTIMAL PERIOD
OF TECHNICAL MAINTENANCE OF INFORMATION-MEASURING
AND CONTROL SYSTEMS**

Abstract. The article considers the main approaches to the technical use of information-measuring and control systems, suggests methods for improving methods for determining the optimal period of maintenance based on the use of neural network technologies.

В настоящее время для успешной эксплуатации различных типов ИИУС необходима достоверная и оперативная оценка их технического состояния (ТС) [1 – 6]. В процессе функционирования ИИУС их ТС может изменяться от исправного до работоспособного, затем до неработоспособного. Состояния системы характеризуются ее параметрами в рассматриваемый момент времени, а для поддержания требуемого уровня надежности ИИУС на всех этапах эксплуатации проводят ее ТО.

Несмотря на применение новых методов эксплуатации, в большинстве случаев отказы ИИУС носят стохастический характер, время возникновения которых затруднительно определить. Мероприятия, выполняемые в рамках ТО, не способны в полной мере предупредить внезапные отказы.

Основная задача управления техническим состоянием сформулирована следующим образом: дана структура модели для определения ТС ИИУС (рис. 1), которая определяется выражениями (1) [1]:

$$\begin{cases} s(t_{n+1}) = h(s(t_n), \mathbf{x}(t_n), \mathbf{v}(t_n)); \\ \mathbf{y}(t_n) = f(s(t_n), t_n), \end{cases} \quad (1)$$

где $s(t, \mathbf{v})$ – ТС ИИУС; $s(t_{n+1})$ – ТС ИИУС в промежуток времени $[t, t_{n+1}]$; h, f – соотношения, задающие текущие значения ТС $s(t)$ и выходных сигналов $y(t)$;

$\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ – вектор входных воздействий;

$\mathbf{y}(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t))^T$ – вектор выходных сигналов;

$\mathbf{v}(t) = (v_1(t), v_2(t), \dots, v_v(t))^T$ – вектор параметров, характеризующих ТС ИИУС;

$\mathbf{u}(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t))^T$, $\mathbf{u}(t) \in U$ – вектор управляющих воздействий (управления техническим состоянием); U – множество допустимых управлений;

$t_1, t_2, \dots, t_n, \dots$ – последовательность моментов контроля и управления ТС ИИУС.

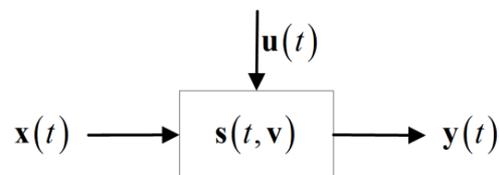


Рис. 1. Модель для определения ТС ИИУС

Система показателей оценки эффективности модифицированного метода определения оптимального периода технического обслуживания ИИУС представлена ниже [7, 8]:

$$\mathcal{E}(\tau) = \{C_{\Sigma}(\tau), K_{ТИ}(\tau), R_{омн}(\tau)\}, \quad (2)$$

где $C_{\Sigma}(\tau)$ – суммарные затраты на техническое обслуживание ИИУС; $K_{ТИ}(\tau)$ – коэффициент технического использования ИИУС; $R_{омн}(\tau)$ – затраты относительно непроизводительно расходуемого ресурса ИИУС за время $\tau = t_n - t_{n-1}$.

Для решения задачи определения оптимального периода ТО, выбран метод-прототип, основа которого заключается в том, что выделяют параметр или группу параметров, однозначно характеризующих ТС ИИУС с известными верхними и нижними границами допусков соответственно. При наличии нескольких определяющих ТС параметров, параметрическая вероятность безотказной работы изделия определяется по формуле: $P_{\text{нар}}(\tau_i) = \prod_{r=1}^M P_r(\tau_i)$,

$$P_{\text{нар}}(\tau_i) = \prod_{r=1}^M P_r(\tau_i), \quad (3)$$

где M – число определяющих параметров ТС ИИУС; $P_r(\tau_i)$ – вероятность невыхода r -го определяющего параметра за пределы допусков в течение прогнозируемого периода τ_i .

Известно, что на процесс изменения величины параметров во времени влияет множество различных независимых факторов, то вероятность безотказной работы (невыхода параметров за пределы допуска) ИИУС по r -му определяющему параметру за время τ определяется как

$$P_r(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r^2(\tau)}} \int_{v_r^H}^{v_r^B} \exp\left\{-\frac{[v_r - \bar{v}_r(\tau)]^2}{2\sigma_r^2(\tau)}\right\} dv_r, \quad (4)$$

где v_r^B и v_r^H – соответственно верхняя и нижняя границы допуска r -го определяющего параметра; $\bar{v}_r(\tau)$ – оценка величины изменения r -го определяющего параметра; $\sigma_r^2(\tau)$ – дисперсия величины изменения r -го определяющего параметра.

Далее производится измерение величины определяющих параметров в заданный период времени. С помощью обучающей выборки данных измерения строят математическую модель оценки изменения определяющих параметров ИИУС полиномиального вида [5]. На основе выборки изменения значений определяющих параметров при помощи метода группового учета аргументов (МГУА) формируется их математическая модель:

$$v(\tau) = \sum_{i=0}^n a_i t^i \left/ \left(1 + \sum_{j=1}^n b_j t^j \right) \right., \quad i, j \in N, \quad n \leq n_{\max}, \quad (5)$$

где a_i, b_j – неизвестные коэффициенты, расчет которых производят с помощью МГУА; N – множество натуральных чисел; n_{\max} – установленное значение максимальной степени полинома.

Такой подход определения оптимального периода ТО требует для своей реализации больших объемов как временных, так и материальных затрат, а результаты могут значительно отличаться от реальных значений ввиду индивидуальных особенностей ИИУС, условий их эксплуатации, показателей надежности, зависящих от конструкции, внешних воздействий, принятой системы ТО и других факторов.

Одним из подходов, который позволяет устранить недостатки метода-прототипа, является применение нейросетевых технологий (НСТ), основным достоинством которых является динамическое саморегулирование моделей оценки изменения определяющих параметров во времени. В работе предложено совместное применение нелинейной рекуррентной модели сети Элмана и нелинейной авторегрессионной модели сети. Сформулировано основное допущение настоящей работы, заключающееся в том, что воздействие таких внешних факторов как пониженная температура внешней среды и низкочастотные вибрации влияют на параметры потребления системой тока, а также на скорость наведения системы визирования. Эти два параметра и были выбраны в качестве параметров, определяющих ТС ИИУС в межрегламентный период эксплуатации. Для идентификации параметров электромеханических ИИУС предлагается использовать рекуррентную модель сети Элмана [2, 4, 5]. Применение сети Элмана позволит сформировать алгоритм построения моделей оценки изменения определяющих параметров ИИУС. Рекуррентная модель сети Элмана формиру-

ется из многослойного персептрона введением обратных связей, при этом, связи идут не от выхода модели сети, а от выходов внутренних нейронов. Это позволяет учесть предысторию наблюдаемых процессов и накопить информацию для формирования адекватной модели изменения параметров во времени [1].

Для построения прогноза оценки изменения определяющих параметров ИИУС предложено использовать нелинейную авторегрессионную модель нейронной сети. Таким образом применение нелинейной рекуррентной модели сети Элмана на этапе построения моделей оценки изменения определяющих параметров ИИУС совместно с нелинейной авторегрессионной моделью сети, позволит учитывать различные условия функционирования и воздействие внешних факторов. Структура саморегулируемой подсистемы построения моделей оценки и прогнозирования изменения определяющих параметров приведена на рис. 2.

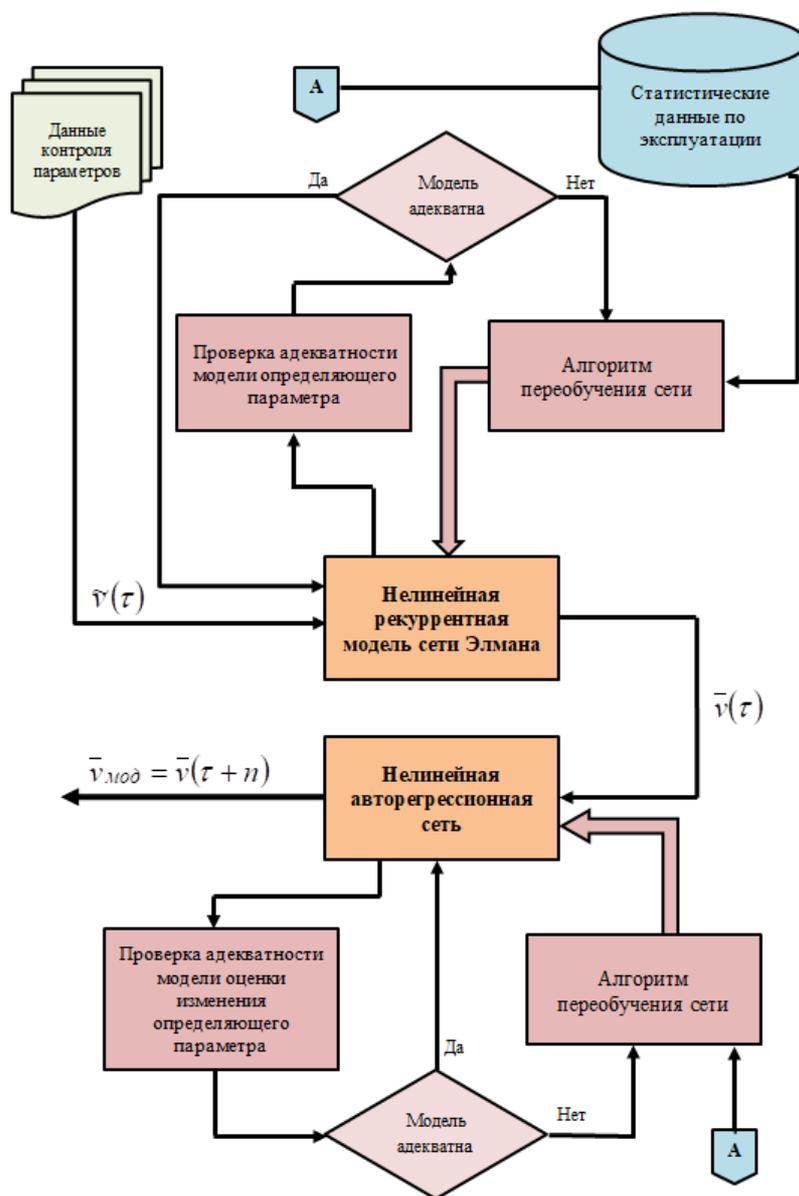


Рис. 2. Структура саморегулируемой подсистемы построения моделей оценки и прогнозирования изменения определяющих параметров

Основа функционирования предлагаемой саморегулируемой подсистемы состоит в следующем: учитывая априорную информацию об изменении определяющих параметров ИИУС, нейронная рекуррентная сеть производит построение моделей оценки изменения определяющих параметров $\bar{v}_r(\tau)$. Далее, учитывая обучающую выборку значений изменений определяющих параметров $\tilde{v}(\tau)$, применяется нелинейная авторегрессионная модель сети, результатом работы которой является прогноз оценки изменений определяющих параметров на период времени $(\tau + n)$. Полученный прогноз оценки изменения определяющих параметров используется для определения оптимального периода технического обслуживания ИИУС.

Предложенный подход находит применение в задачах оценки надежности и определения оптимального периода ТО при эксплуатации как аппаратного оснащения, так и программного обеспечения программных модулей информационно-измерительных и управляющих систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-08-00457-а.

Список использованных источников

1. Application of generalized distribution laws for the reliability assessment of information and measuring systems of energy saving control / Yu. T. Zyryanov, N. G. Chernyshov, I. G. Ryazanov et al. // Journal of Physics: Conf. Series 1172 (2019) 012108, IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1172/1/012108.

2. Зырянов, Ю. Т. Планирование профилактики в организационно-технических системах / Ю. Т. Зырянов, К. А. Малыков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 2. – С. 410 – 420.

3. Rastegari, Ali. Condition based maintenance in the manufacturing industry from strategy to implementation / Ali Rastegari. – Mälardalen Universitet, Sweden, 2017. – 106 p.

4. Рязанов, И. Г. Техническое диагностирование информационно-измерительной и управляющей системы с применением нейросетевых технологий / И. Г. Рязанов, Ю. Т. Зырянов, А. Ю. Наумова // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика, 2019. – № 5. – С. 37 – 46. (Специальность 05.11.16).

5. Определение оптимальной периодичности технического обслуживания информационно-измерительных и управляющих систем с применением нейросетевых технологий / И. Г. Рязанов, Н. Г. Чернышов, Ю. Т. Зырянов, А. Ю. Наумова // Вестник ТГТУ. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 197 – 205.

6. Об оптимальной периодичности технического обслуживания сложных информационно-измерительных систем / Ю. Т. Зырянов, Д. Н. Ледовских, И. Г. Рязанов, А. Ю. Наумова // Вестник ТГТУ. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 236 – 245.

7. Об одном подходе к формированию смешанной системы управления техническим состоянием радиотехнических систем / Ю. Т. Зырянов, В. В. Лебедев, Д. Н. Ледовских, И. Г. Рязанов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 49 – 59.

8. Карпов, И. Г. Одномерные распределения триномиального типа для последовательности независимых испытаний / И. Г. Карпов, Ю. Т. Зырянов, И. Г. Рязанов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 2 (310). – С. 133 – 138. (Специальность 05.11.16).

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

А. О. Уланов, Х. Л. М. Маджед

(Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия)

УГРОЗЫ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ, МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ

Аннотация. Рассматривается понятие угрозы информационной безопасности. Виды и классификации угроз. Меры по предотвращению возникновения угроз безопасности информационных систем.

A. O. Ulanov, H. L. M. Majed

(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

SECURITY THREATS TO INFORMATION SYSTEMS, MEASURES TO PREVENT

Abstract. The concept of information security threats. Types and classifications of threats. Measures to prevent threats to the security of information systems.

Развитие информационных систем и технологий ставит современное общество в зависимость от уровня надежности их функционирования, в связи с этим важнейшее значение приобрели задачи защиты их от негативных воздействий, угрожающих информационной безопасности.

Под угрозой информационной безопасности понимают «совокупность условий и факторов, создающих потенциальную опасность нарушения безопасности информации» [1], которые могут стать причиной нарушения целостности, доступности и конфиденциальности хранящейся, передаваемой или обрабатываемой информации. Исходя из этого определения, угроза безопасности информационных систем (ИС) – это потенциальная или реально существующая опасность, которая посредством воздействия на информацию или другие компоненты информационных систем может прямо или косвенно привести к ущербу интересам субъектов информационных отношений. Анализ характера нарушений информационной безопасности показал существование большого количества угроз различного происхождения. Для создания эффективной системы защиты необходимо выявление и учет факторов, оказывающих воздействие на защищаемый объект.

По источникам возникновения угрозы можно подразделить на внешние и внутренние:

Внутренние угрозы могут проявляться в следующих формах:

- ошибки пользователей и системных администраторов;
- нарушения сотрудниками установленных регламентов сбора, обработки, передачи и уничтожения информации;
- ошибки в работе программного обеспечения;
- отказы и сбои в работе компьютерного оборудования.

Источниками таких угроз являются:

1. Сотрудники организации.
2. Программное обеспечение.
3. Аппаратные средства.

Формами проявления внешних угроз являются:

- заражение компьютеров вирусами или вредоносными программами;
- несанкционированный доступ к корпоративной информации;
- информационный мониторинг со стороны конкурентов, разведывательных и специальных служб;
- действия государственных структур и служб, сопровождающиеся сбором, модификацией, изъятием и уничтожением информации;
- аварии, пожары, техногенные катастрофы, стихийные бедствия.

К внешним источникам угроз относятся:

1. Компьютерные вирусы и вредоносные программы.
2. Организации и отдельные лица.
3. Стихийные бедствия [2].

По условиям происхождения угрозы можно классифицировать на преднамеренные (умышленные) и случайные (неумышленные).

Преднамеренный характер угроз возникает в результате злоумышленных действий людей.

Случайное происхождение угроз обусловлено спонтанными обстоятельствами, возникающими в ИС в процессе их функционирования и эксплуатации. Наиболее известными событиями такого рода являются: сбои и отказы технических средств, ошибки при разработке ИС, алгоритмические и программные ошибки, ошибки пользователей и обслуживающего персонала, стихийные бедствия и аварии.

По способам воздействия на объекты информационной безопасности угрозы подлежат следующей классификации: информационные, программные, физические, радиоэлектронные и организационно-правовые.

К информационным угрозам относятся:

- несанкционированный доступ к информационным ресурсам;
- незаконное копирование данных в информационных системах;
- хищение информации из библиотек, архивов, банков и баз данных;
- нарушение технологии обработки информации;
- противозаконный сбор и использование информации.

К программным угрозам относятся:

- использование ошибок в программном обеспечении;
- компьютерные вирусы и вредоносные программы;
- установка «закладных» устройств.

К физическим угрозам относятся:

- уничтожение или разрушение средств обработки информации и связи;
- хищение носителей информации;
- хищение программных или аппаратных ключей и средств криптографической защиты данных;
- воздействие на персонал.

К радиоэлектронным угрозам относятся:

- внедрение электронных устройств перехвата информации в технические средства и помещения;
- перехват, расшифровка, подмена и уничтожение информации в каналах связи.

К организационно-правовым угрозам относятся:

- нарушение требований законодательства и задержка в принятии необходимых нормативно-правовых решений в информационной сфере;
- закупки несовершенных или устаревших информационных технологий и средств информатизации [3].

Предпосылки возникновения угроз носят объективный и субъективный характер:

- объективные (количественная или качественная недостаточность элементов системы), не связанные непосредственно с деятельностью людей и вызывающие случайные по характеру происхождения угрозы;
- субъективные, непосредственно связанные с деятельностью человека и вызывающие как преднамеренные (специально организуемая деятельность,

профессионально ориентированная на добывание необходимой информации всеми доступными средствами, включая разведку, промышленный шпионаж; злоумышленные действия, направленные на хищение информации или компьютерных программ в целях наживы; действия недобросовестных сотрудников, приводящие к хищению (копированию) или уничтожению информационных массивов и/или программ по эгоистическим или корыстным мотивам, а также в результате несоблюдения установленного порядка работы с информацией), так и непреднамеренные угрозы информации (плохое психофизиологическое состояние, недостаточная подготовка, низкий уровень знаний).

Для защиты интересов субъектов информационных отношений необходима реализация следующих мер:

– на законодательном уровне (законы, нормативные акты, стандарты и т.п.). Законодательный уровень является важнейшим для обеспечения информационной безопасности. К мерам этого уровня относится регламентация законом и нормативными актами действий с информацией и оборудованием, и наступление ответственности за нарушение правильности таких действий.

– на административном уровне (действия общего характера, предпринимаемые руководством организации). Главная цель мер административного уровня – сформировать программу работ в области информационной безопасности и обеспечить ее выполнение, выделяя необходимые ресурсы и контролируя состояние дел. Основой программы является политика безопасности, отражающая подход организации к защите своих информационных активов. Руководство каждой организации должно осознать необходимость поддержания режима безопасности и выделения на эти цели значительных ресурсов.

– процедурный уровень предусматривает конкретные меры безопасности, ориентированные на людей. Меры данного уровня включают в себя: мероприятия, осуществляемые при проектировании, строительстве и оборудовании вычислительных центров и других объектов систем обработки данных; мероприятия по разработке правил доступа пользователей к ресурсам системы (разработка политики безопасности); мероприятия, осуществляемые при подборе и подготовке персонала, обслуживающего систему; организацию охраны и режима допуска к системе; организацию учета, хранения, использования и уничтожения документов и носителей информации; распределение реквизитов разграничения доступа; организацию явного и скрытого контроля за работой пользователей; мероприятия, осуществляемые при проектировании, разработке, ремонте и модификациях оборудования и программного обеспечения.

– программно-технический уровень определяет меры защиты, основанные на использовании специальных программ и аппаратуры и выполняющих (самостоятельно или в комплексе с другими средствами) функции защиты: идентификацию и аутентификацию пользователей; разграничение доступа к ресурсам; регистрацию событий; криптографические преобразования; проверку

целостности системы; проверку отсутствия вредоносных программ; программную защиту передаваемой информации и каналов связи; защиту системы от наличия и появления нежелательной информации; создание физических препятствий на путях проникновения нарушителей; мониторинг и сигнализацию соблюдения правильности работы системы; создание резервных копий ценной информации [1].

В данной работе проведен обзор основных угроз безопасности ИС и меры по их предотвращению.

Список использованных источников

1. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения. – Введ. 2008-02-01. – М., 2008. – 8 с.
2. Гафнер, В. В. Информационная безопасность : учеб. пособие / В. В. Гафнер. – Ростов н/Д : Феникс, 2010. – 324 с.
3. Алексеев, Д. М. Классификация угроз информационной безопасности / Д. М. Алексеев, К. Н. Иваненко, В. Н. Убирайло // Символ науки: ООО «ОМЕГА САЙНС». – 2016. – № 9-1(21). – С. 18 – 20.

А. А. Широкий¹, В. Н. Финьков²

(¹Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН;

²Индивидуальный предприниматель (риск-аудит), Москва, Россия)

ОЦЕНКА РИСКОВ ОХРАНЯЕМЫМ ОБЪЕКТАМ И УПРАВЛЕНИЕ ОХРАННЫМИ МЕРАМИ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОЙ СТРАТЕГИИ

Аннотация. Решается задача выбора охранных мер для защиты удаленных газовых скважин. Приводятся модели оценки рисков природного и антропогенного характера. Модель принятия решения заказчиком охранных услуг реализована в виде поиска оптимальной стратегии в игре с природой в нормальной форме.

A. A. Shiroky¹, V. N. Finkov²

(¹V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Science Academy;

²Private Entrepreneur (Risk Auditor), Moscow, Россия)

ASSESSING THE RISKS TO FACILITIES UNDER PROTECTION AND MANAGING THE SECURITY MEASURES USING BAYES'S STRATEGY

Abstract. The article solves the problem of choosing the guarding measures for the remote natural gas wells. The paper contains models of natural and artificial risks assessment. The decision model for the security provider's client are reduced to the search for an optimal strategy in normal-form game with nature.

Введение. Оценка всевозможных рисков и управление ими является основой планирования и принятия управленческих решений в современном бизнесе. Существующие модели и инструменты позволяют решать широкий класс задач, связанных с управлением рисками. Особенно активно этот инструментарий применяется в финансовом секторе (страховые и инвестиционные компании, банки и т.д.), а также в сфере обеспечения безопасности.

При решении задач о формировании комплекса охранных мер также полезно провести оценку возможного ущерба и соотнести ее со стоимостью реализации защиты. Применяемые методы оценки могут быть различными и во многом зависят от специфики решаемой охранной задачи. Особенно хочется отметить набирающий популярность теоретико-игровой подход, позволяющий детально исследовать проблемы безопасности в терминах игры с активным противником (см., например, обзор в [1]). Аппарат теории игр активно применяется для моделирования террористических угроз [2, 3], оценки рисков при охране государственной границы [4], объектов критической инфраструктуры [5, 6] подбора средств защиты информации [7].

В настоящей работе приводятся модели оценки рисков природного и антропогенного характера, решается практическая задача выбора охранных мер для газовых скважин. Модель принятия решения заказчиком охранных услуг реализована в виде поиска оптимальной стратегии в матричной игре.

Постановка задачи

Пусть T – конечное множество из n угроз, упорядоченное каким-либо образом. Для каждого неблагоприятного события $T_i \in T$ зададим вероятность p_i его наступления в течение выбранного временного промежутке Δt и величину риска $R_0(T_i)$, составляющую ожидаемые потери заказчика охранных услуг в случае, если событие T_i произошло. Будем считать элементы множества T независимыми событиями.

Зададим множество наборов охранных мер M . Применение набора $M_j \in M$ изменяет (обычно снижает) риски. Величину ожидаемых потерь от наступления события T_i при условии реализации набора мер M_j будем обозначать как $R_j(T_i)$. Отметим, что реализация набора охранных мер сама по себе означает появление затрат у заказчика. Величину затрат на реализацию набора M_j в течение времени Δt будем обозначать как c_j .

Поскольку все события мы полагаем независимыми, то

$$\sum_{i=1}^n p_i < 1 \quad (1)$$

Добавим еще одно – фиктивное – событие T_0 , соответствующее ситуации, когда за время Δt ни одна угроза не реализовалась. Вероятность его наступления определяется как $p_0 = 1 - \sum_{i=1}^n p_i$. Тогда совокупный риск заказчика охран-

ных услуг при реализации набора охранных мер M_j можно оценить с помощью формулы Байеса:

$$R(M_j) = c_j + \sum_{i=0}^n p_i R_j(T_i). \quad (2)$$

Задача оценки риска охраняемому объекту заключается в нахождении

$$R = \operatorname{argmin}_{M_j \in M} R(M_j). \quad (3)$$

Покажем, что задача выбора оптимального набора охранных мер сводится к поиску оптимальной стратегии в матричной игре с природой, где один игрок – заказчик охранных услуг, а другой реализует смешанную стратегию с известным распределением вероятностей. Для этого составим платежную матрицу (табл. 1).

1. Платежная матрица игры с природой для n угроз и m наборов охранных мер. В скобках для угроз указаны вероятности их реализации, для контрмер – их стоимость

Угрозы \ Наборы контрмер	$T_0 (1 - \sum_{i=1}^n p_i)$	$T_1(p_1)$...	$T_n(p_n)$
$M_0(0)$	0	$R_0(T_1)$...	$R_0(T_n)$
$M_1(c_1)$	c_1	$R_1(T_1)$...	$R_1(T_n)$
...
$M_m(c_m)$	c_m	$R_m(T_1)$...	$R_m(T_n)$

Такое представление позволяет оценить вероятные потери заказчика охранных услуг как в случае полного непринятия мер по охране объекта, так и при применении любого из предложенных наборов контрмер. Нахождение минимума (3) и выбор соответствующего ему набора охранных контрмер соответствует применению байесовской стратегии, что дает максимальный ожидаемый выигрыш в матричной игре с природой.

Ниже приведен пример оценки рисков для реально существующего объекта – удаленной газовой скважины.

Моделирование угроз удаленным скважинам. Рассматриваемые охраняемые объекты – комплекс удаленных газовых скважин – находятся в аридной климатической зоне неподалеку от небольшого рабочего поселка и нескольких фермерских хозяйств. На скважинах размещено сложное техническое оборудо-

вание (задвижки, аварийные пульта управления), охраняемый периметр сформирован металлическим забором.

Географическое расположение объекта, его назначение и техническое оснащение позволяют сформировать следующее множество угроз:

1. Степной пожар (T_1).
2. Вандализм (T_2).
3. Хищение оборудования (T_3).

Также формально еще существует угроза террористического акта. Однако, с учетом того, что охранное предприятие не располагает возможностями для эффективного предотвращения этой угрозы, а также малонаселенности местности (а следовательно, малой привлекательности для террористической атаки), эту угрозу в рамках данной работы мы рассматривать не будем.

Зафиксируем Δt , равное одному календарному месяцу. Оценивать вероятности наступления этих событий в течение заданного времени часто приходится экспертно. В данном случае так пришлось поступить с событием T_3 – единственной количественной оценкой, на которую можно было бы опереться, является число зафиксированных на территории рабочего поселка и его окрестностей попыток кражи металлических оград и металлоемкого оборудования. Такие события случаются 1 – 2 раза за год, поэтому p_3 было принято равным 0,125.

Для оценки вероятности наступления остальных событий исходных данных было больше. Так, для события T_1 (степной пожар) доступна ретроспективная статистика от МЧС о числе загораний и пожаров на интересующей нас территории. За 36 месяцев произошло два пожара, поэтому $p_1 = \frac{2}{36} = 0,056$.

События типа T_2 (вандализм) во всех наблюдаемых случаях предпринимались группами лиц, преимущественно состоящими из жителей близлежащего рабочего поселка. По данным местного участкового уполномоченного, в поселке проживает 10 человек, имеющих приводы (включая случаи, когда административный материал не составлялся) в полицию в связи с противоправными действиями, направленными на причинение имущественного вреда. В дальнейшем будем именовать их «подстрекателями». Во всех без исключения случаях «подстрекатели» находились в состоянии сильного алкогольного опьянения.

Механизм образования группы, склонной к вандальным действиям, выглядит следующим образом. Вначале формируется группа «отдыхающих», в состав которой должен войти как минимум один «подстрекатель». Эмпирически установлена корреляция между частотой появления лиц в этом состоянии и выплатой вознаграждения сельскохозяйственным рабочим, поэтому можем считать, что формирование групп происходит один раз в месяц. Затем группа должна определить место «отдыха» (остаться на территории рабочего поселка, или выехать в одном из трех возможных направлений). На месте отдыха группа

в одном случае из четырех (экспертная оценка) принимает решение развлечься, уничтожая материальные ценности в пределах доступности. Таким образом, оценка вероятности вандальных действий на охраняемом объекте оценивается так: $p_1 = \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \left(1 - \frac{1}{4}\right)^{10} = 0,236$.

Выбор набора охранных мер. Будем выбирать наборы охранных мер из следующего множества $M = \{M_0, M_1, M_2, M_3\}$, где M_0 – это отсутствие охранных мер (только забор по периметру), M_1 – установка фотоловушек, M_2 – развертывание системы видеонаблюдения, M_3 – организация работы круглосуточного стационарного поста. Стоимость реализации охранных мер в течение месяца известна. В таблице 2 приведены коэффициенты преобразования ожидаемых в течение месяца потерь при реализации охранных мер из множества M (получены методом экспертных оценок).

2. Ожидаемые ежемесячные потери заказчика при реализации различных наборов охранных мер и понижающие коэффициенты для потерь от неблагоприятных событий (в скобках)

<i>Угрозы</i> <i>Наборы контрмер</i>	<i>T₀ – нет неблагоприятных событий</i>	<i>T₁ – степной пожар</i>	<i>T₂ – вандализм</i>	<i>T₃ – хищение</i>
<i>M₀ – нет контрмер</i>	0k Р (1)	1 000k Р (1)	400k Р (1)	100k Р (1)
<i>M₁ – установка фотоловушек</i>	0,55k Р (1)	1 000,55k Р (1)	67,22k Р ($\frac{1}{6}$)	17,22k Р ($\frac{1}{6}$)
<i>M₂ – развертывание системы видеонаблюдения</i>	15k Р (1)	515k Р (0,5)	81,67k Р ($\frac{1}{6}$)	31,67k Р ($\frac{1}{6}$)
<i>M₃ – стационарный пост 24x7</i>	140k Р (1)	240k Р (0,1)	0k Р (0)	0k Р (0)

Воспользуемся байесовской стратегией для минимизации риска заказчика охранных услуг. Получим, что в данном случае целесообразно развернуть на объекте систему видеонаблюдения. Величина ожидаемых потерь, рассчитанная по формуле (2), в этом случае составит 60,82 тыс. рублей в месяц, что явно меньше затрат на организацию стационарного поста (140 тыс. рублей) и благоприятнее, чем менее затратный вариант с фотоловушками, где риск составит 80,39 тыс. рублей.

Заключение. Зачастую руководители организаций-заказчиков охранных услуг не в полной мере представляют себе набор угроз и формы их реализации

на конкретном объекте. В большинстве случаев их определение полностью отдается на откуп охранной организации, что с учетом ее целеполагания закономерно приводит к применению набора мер, выгодного в первую очередь ей, а не заказчику. При этом его соответствие реальным угрозам проверяется по факту их реализации – т.е. меры безопасности корректируются тогда, когда ущерб уже нанесен.

Предложенный в настоящей работе подход позволяет превентивно оценивать риски в результате наступления различных классов событий неопределенности и, на взгляд авторов, будет полезен для оптимизации набора охранных мер на широком классе охраняемых объектов. Работоспособность и эффективность предложенного способа подтверждается внедрением на одном из реально действующих предприятий нефтегазового сектора.

Список использованных источников

1. Game Theory for Security and Risk Management / ed. by S. Rass, S. Schauer. – Basel (Switzerland): Birkhäuser, 2018. – 418 p.

2. Zhang L., Reniers G. A Game-Theoretical Model to Improve Process Plant Protection from Terrorist Attacks // Risk Analysis. – Vol. 36, № 12, 2016. – P. 2285–2297.

3. Оценка эффективности применения математических моделей, реализуемых в структурах министерства внутренних дел при возникновении террористических угроз / Е. Н. Кадочникова, А. В. Фетисов, А. К. Черных, А. Ю. Гарькушев // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 3–4 (81–82). – С. 92 – 97.

4. Шумов, В. В. Теоретико-игровая модель пограничного сдерживания / В. В. Шумов // Управление большими системами: сборник трудов. – 2013. – № 42. – С. 217 – 232.

5. Misuri, A. A Bayesian network methodology for optimal security management of critical infrastructures / A. Misuri, N. Khakzad, G. Reniers, V. Cozzani // Reliability Engineering and System Safety, in press.

6. Wei, L. Risk Assessment of Coordinated Cyber-Physical Attacks Against Power Grids: A Stochastic Game Approach / L. Wei, A. I. Sarwat, W. Saad // 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Portland, OR, 2016, – P. 1–7.

7. Алехин, И. В. Модели параметров оценки изменения риска возникновения угроз в информационных и технических системах / И. В. Алехин, А. Н. Голубинский // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – 2015. – С. 247 – 249.

Ю. В. Алферов, С. А. Мартиросов, А. В. Семенюк, А. А. Шнайдер
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), Тамбов, Россия)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «БАСТИОН» ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СЕТЕВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. Приводится применение программного комплекса «Бастيون» для управления информационной безопасностью сетевой информационной системы.

Yu. V. Alferov, S. A. Martirosov, A. V. Semenyuk, A. A. Shnayder
(The Multiservice Training Center and Radio Electronic Warfare Tactical Employment, Tambov, Russia)

USE OF THE BASTION SOFTWARE COMPLEX FOR INFORMATION SECURITY MANAGEMENT NETWORK INFORMATION SYSTEM

Abstract. The paper presents the use of the Bastion software package for managing information security of a network information system.

С развитием информационных технологий все более важным аспектом теории управления становится управление информационной безопасностью. Управление информационной безопасностью включает в себя комплекс мероприятий, направленных на обнаружение уязвимостей, оценку рисков, разработку мер защиты информации и контроль исполнения разработанных мер.

Анализ угроз информационной безопасности возможно производить с помощью сканеров уязвимостей сети. Сканер уязвимостей сети – жизненно необходимое средство для компаний, чья деятельность напрямую связана с хранением и обработкой уникальных баз данных, конфиденциальной информации, ценных архивов. Без сомнения, сканеры сети необходимы организациям в сферах обороны, науки, медицины, торговли, ИТ, финансов, рекламы, производства, для органов власти и диспетчерских служб – словом, везде, где нежелательна или даже опасна утечка накопленной информации, имеются базы персональных данных клиентов.

Сетевые сканеры направлены на решение следующих задач:

- идентификация и анализ уязвимостей;
- инвентаризация ресурсов, таких как операционная система, программное обеспечение и устройства сети;
- формирование отчетов, содержащих описание уязвимостей и варианты их устранения.

Сканеры уязвимостей сети при своей работе используют два основных механизма. Первый – зондирование – не слишком оперативен, но точен [1]. Это механизм активного анализа, который запускает имитации атак, тем самым проверяя уязвимость. При зондировании применяются методы реализации атак, которые помогают подтвердить наличие уязвимости и обнаружить ранее не выявленные «провалы».

Второй механизм – сканирование – более быстрый, но дает менее точные результаты [2]. Это пассивный анализ, при котором сканер ищет уязвимость без подтверждения ее наличия, используя косвенные признаки. С помощью сканирования определяются открытые порты и собираются связанные с ними заголовки. Они в дальнейшем сравниваются с таблицей правил определения сетевых устройств, ОС и возможных «дыр». После сравнения сетевой сканер безопасности сообщает о наличии или отсутствии уязвимости. В общем случае алгоритм работы сканеров следующий:

- проверка заголовков;
- активные зондирующие проверки (*active probing check*);
- имитация атак (*exploit check*).

Проверка заголовков – это самый простой и быстрый способ на основе сканирования, однако имеющий ряд недостатков. Так, вывод о «провале» делается лишь по результатам анализа заголовков. К примеру, проверяя *FTP*-сервер, сканер узнает версию обеспечения и на основе этой информации сообщает о возможных уязвимостях. Естественно, специалисты по сетевой безопасности осведомлены о ненадежности этого метода, однако как первый шаг сканирования – это оптимальное решение, не приводящее к нарушению работы сети.

При активном зондирующем сканировании не проверяется версия программного обеспечения, а сравнивается «цифровой слепок» фрагмента программы со «слепком» уязвимости. По тому же принципу действуют антивирусные программы, сравнивая программное обеспечение с имеющимися в базе сигнатурами вирусов. Тоже достаточно быстрый метод, хотя и медленнее первого, с большим коэффициентом надежности.

Имитация атак – это зондирование, которое эксплуатирует дефекты в программном обеспечении. Таким образом подается своеобразный импульс некоторым уязвимостям, которые незаметны до определенного момента. Эффективный метод, однако применить его можно не всегда. Так, вероятна ситуация, когда даже имитируемая атака просто отключит проверяемый узел сети или уязвимость окажется негодна для реализации атаки [3].

Для решения проблемы анализа сети был разработан программный комплекс «Бастион». Комплекс «Бастион» имеет модульную архитектуру (рис. 1). По назначению модули разделены на несколько групп: модули анализа проводных и беспроводных сетей (взаимодействие с сетью), модули обнаружения и эксплуатации уязвимостей программного обеспечения и модули взаимодействия с базами данных.



Рис. 1. Модульная архитектура комплекса «Бастион»

Модуль сканирования сети осуществляет процесс скрытого сканирования сети с целью обнаружения устройств. Параметры настройки сканирования позволяют выбрать диапазон сканируемых *IP*-адресов, метод осуществления процесса сканирования. В результате работы модуль предоставляет информацию о физическом адресе устройства, операционной системе и *IP*-адресе. Полученная информация будет использована при определении программных уязвимостей устройств. Результат работы данного модуля представлен на рис. 2.

IP	MAC	OS	Vendor	Info
169.254.182.203	10-C3-7B-4E-F5-EE	Microsoft Windows Vista SP2, Windows 7 SP1, or Windows Serv...	Asustek Computer	up
169.254.182.204	N/A	Linux 3.8 - 3.19	N/A	up
169.254.182.0	N/A	N/A	N/A	down
169.254.182.1	N/A	N/A	N/A	down
169.254.182.2	N/A	N/A	N/A	down
169.254.182.3	N/A	N/A	N/A	down
169.254.182.4	N/A	N/A	N/A	down
169.254.182.5	N/A	N/A	N/A	down

Рис. 2. Результаты работы модуля сканирования сети комплекса «Бастион»

Для организации специальных программных воздействий на РЭОб взаимодействующих посредством беспроводных сетей в комплексе «Бастион» разработан модуль сканирования *Wi-Fi*, который позволяет выполнять поиск и об-

наружение скрытых точек доступа и подключенных к ним абонентских терминалов. Модуль выполняет перехват данных, передаваемых по беспроводным сетям стандарта 802.11 и определяет используемый тип шифрования. В процессе работы модуль отображает уровень сигнала беспроводной сети, скорость передаваемых данных и используемый канал. Результат работы модуля представлен на рис. 3.

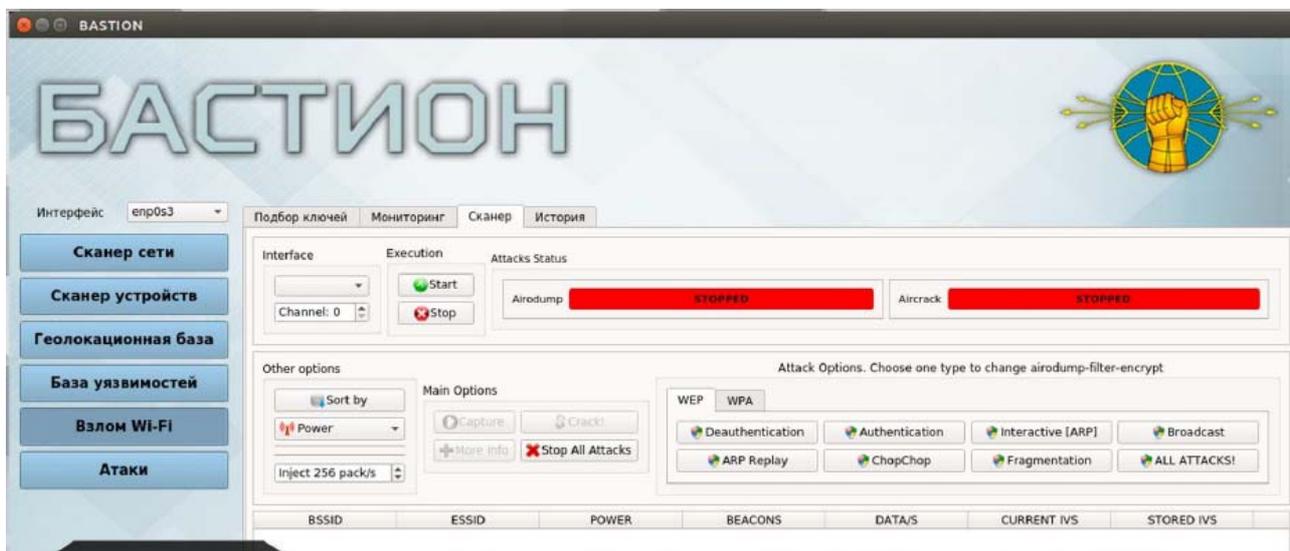


Рис. 3. Работа *Wi-Fi* сканера комплекса «Бастيون»

Для определения ключа шифрования данных, собранных модулем сканирования *Wi-Fi*, используется модуль подбора ключей аутентификации (рис. 4). В процессе аудита используются уязвимости в протоколах обеспечения безопасности беспроводной передачи данных, а именно *WEP* и *WPA-PSK*, а также методы перебора ключей – полного, частичного или с использованием словаря.



Рис. 4. Работа модуля подбора ключей комплекса «Бастيون»

Разработанный программный комплекс позволяет ускорить процесс анализа уязвимостей сетевой информационной системы, что оказывает существенное влияние на управление информационной безопасностью.

Список используемых источников

1. Организация сетевого администрирования (лекции часть 1). Лекция 33 Виды и типы сетевых атак [Электронный ресурс]. – URL : <https://studfiles.net/preview/6449353/> (Дата обращения: 29.07.2019)
2. Рассел, Р. Защита от хакеров корпоративных систем / Р. Рассел. – 2-е изд. – Изд-во ДМК. – 2005. – 558 с.
3. Фленов, М. Е. Linux глазами хакера / М. Е. Фленов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 544 с.

Ю. В. Алферов, С. А. Мартиросов, А. В. Семенюк, А. А. Шнайдер
(Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), Тамбов, Россия)

УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБЪЕКТА ПУТЕМ СКАНИРОВАНИЯ УЯЗВИМОСТЕЙ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «БАСТИОН»

Аннотация. Приводится применение программного комплекса «Бастион» для управления информационной безопасностью радиоэлектронного объекта путем сканирования уязвимостей устройств.

Yu. V. Alferov, S. A. Martirosov, A. V. Semenyuk, A. A. Shnyder
(The Multiservice Training Center and Radio Electronic Warfare Tactical Employment, Tambov, Russia)

INFORMATION SECURITY MANAGEMENT RADIO ELECTRONIC OBJECT BY SCANNING VULNERABILITY OF DEVICES USING SOFTWARE COMPLEX “BASTION”

Abstract. The paper presents the use of the Bastion software package for managing the information security of a radio-electronic object by scanning device vulnerabilities.

Информационные системы очень плотно вошли в нашу жизнь. На сегодняшний день уже нет таких сфер деятельности, в которых бы не использовались компьютеры, телефоны, смартфоны, носители информации и другие радиоэлектронные объекты (РЭО). Военная сфера не является исключением. В связи с этим все большее значение приобретают задачи обеспечения устой-

чивого и бесперебойного функционирования РЭО Российской Федерации и организации специальных программных воздействий на РЭО в информационной структуре условного противника. Также важной задачей является управление информационной безопасностью РЭО путем сканирования уязвимостей.

Специальные программные воздействия – комплекс программных мероприятий и действий, направленных на преодоление системы безопасности РЭО с целью получения закрытой информации, захвата управления, дезинформирования или выведения из строя.

Атакой называется организация специальных программных воздействий.

Источник атаки – программа (оператор), ведущая атаку и осуществляющая непосредственное воздействие [1].

Атаки подразделяются на семь классов: отказ в обслуживании (*DenialofService*), утечка информации, нарушение прав доступа к файлу, дезинформация, получение доступа к специальным файлам и базам данных, удаленное выполнение программ, расширение прав [2]. Для осуществления этих атак существуют следующие распространенные методы:

1) использование эксплойтов – специальных программ, эксплуатирующих уязвимости в программных средствах, на сегодняшний день существует множество Интернет-ресурсов, в которых постоянно публикуются новые открытые уязвимости в программных продуктах, а также, зачастую, и сами эксплойты;

2) внедрение *Shell*-кода в программы и сервисы для изменения их работы, кроме того, с помощью *shell*-кода атакующий может получить права суперпользователя и выполнять различные команды;

3) sniffинг (*sniffing*) – прослушивание сетевого трафика с целью получения информации;

4) спуфинг (*spoofing*) – подмена сетевых объектов, фальсификация идентификационных данных, *IP*, *MAC* адресов, внутрипакетных данных;

5) *DoS*-атака – вызов ошибки в программе или перегрузка канала/мощности атакуемой машины [3].

Кроме того, по расположению субъекта атаки относительно атакуемого объекта атаки могут быть внутренними (имеется физический доступ к атакуемому компьютеру), внешними из глобальной сети и внешними из локальной сети.

Отдельно стоит выделить внешние атаки из локальной сети, так как они являются одними из самых опасных. Атакующий, получив доступ к одному из компьютеров атакуемой сети, либо подключившись к ней, может с легкостью завладеть всеми данными этой сети, осуществлять перехват трафика, сетевых сеансов, изменять отправляемые в глобальную сеть пакеты или вызвать системные сбои подключенных серверов.

К таким атакам относятся атаки типа «Посредник» (*Man-In-The-Middle*, «посредник»), основная идея которых состоит в том, чтобы занять место на пути сетевого трафика между хостами и осуществлять его прослушку и изменение. Сегодня прослушивать трафик стало сложнее ввиду того, что повсеместно

стали использовать маршрутизаторы и коммутаторы. Старые сети повторяли данные на все узлы, позволяя всем в сети видеть весь трафик. Коммутаторы же не дают такой возможности.

По этой причине появилась необходимость в искусственном перенаправлении трафика. Для его осуществления сети могут быть атакованы разными способами, такими как *MACFlooding*, *ARPSpoofing* или *Spoofing* пакетов маршрутизации. Данные методы сбивают с толку оборудование и передает сетевой трафик на атакующий хост.

В данной работе для поиска уязвимостей устройств предлагается использовать программный комплекс «Бастион».

В отличие от существующих сканеров сетевой безопасности, программный комплекс «Бастион» имеет следующие преимущества:

- высокая скорость проверки доступности и сканирование портов;
- противодействие обнаружению процесса сканирования;
- отсутствие недеklarированных возможностей и программных закладок в разрабатываемом программном комплексе;
- автоматизированный процесс сбора и анализа результатов сканирования;
- определение местоположения РЭО по результатам сканирования;
- обнаружение скрытых точек доступа и абонентских терминалов беспроводных сетей, подключенных к ним;
- подбор *WEP*, *WPA-PSK* ключей аутентификации беспроводных сетей стандарта 802.11;
- определение уязвимостей программного и аппаратного обеспечения сканируемого объекта.

Комплекс «Бастион» имеет модульную архитектуру (рис. 1). По назначению модули разделены на несколько групп: модули анализа проводных и беспроводных сетей РЭО (взаимодействие с сетью), модули обнаружения и эксплуатации уязвимостей программного обеспечения и модули взаимодействия с базами данных.



Рис. 1. Модульная архитектура комплекса «Бастион»

Модуль сканирования портов предназначен для скрытного выявления работы сервисов и служб, запущенных на сканируемом устройстве. Параметры настройки сканирования позволяют выбрать метод сканирования, диапазоны сканируемых портов и адресов РЭО в сети, а также протокол передачи данных. В результате работы модуль предоставляет информацию о доступных для взаимодействия сервисах РЭО, номера их порта и название службы. Результат работы данного модуля представлен на рис. 2.



Рис. 2. Результаты работы модуля сканирования устройств комплекса «Бастсион»

Результаты работы показанных модулей используются для организации специальных программных воздействий, хранящихся в базе уязвимостей. База уязвимостей (рис. 3) содержит описание уязвимости на английском языке, список подверженного этой уязвимости программного обеспечения, условия использования и вредоносный код эксплуатации.



Рис. 3. База уязвимостей комплекса «Бастсион»

Сформированная геолокационная база данных используется для осуществления специальных воздействий на радиоэлектронные объекты по принадлежности к стране, региону или городу (рис. 4). Комплекс «Бастион» автоматически формирует и отображает перечень стран, регионов, городов и соответствующих им диапазонов IP-адресов. Также модуль позволяет определить географическое местоположение введенного IP-адреса.

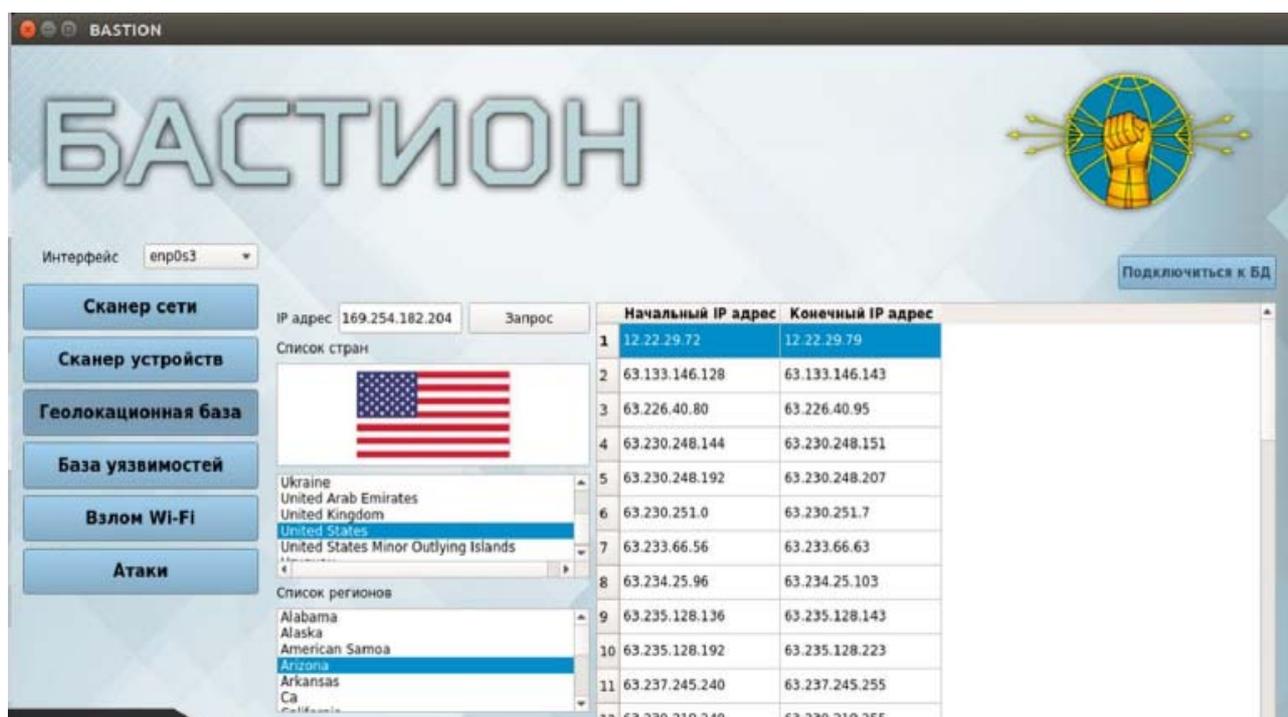


Рис. 4. Работа геолокационная базы данных комплекса «Бастион»

Разработанный программный комплекс используется для анализа информационной инфраструктуры радиоэлектронных объектов, что позволяет эффективно управлять информационной безопасностью РЭО.

Список используемых источников

1. Бабин, С. А. Инструментарий хакера / С. А. Бабин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2015. – 240 с.
2. Weidman, G. Penetration testing: a hands-on introduction to hacking / Georgia Weidman. – USA : No Starch Press. – 2014. – 531 с.
3. Уолтон, Ш. Создание сетевых приложений в среде Linux / Ш. Уолтон ; пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2001. – 464 с. : ил. – Парал. тит. англ.

И. Н. Донских¹, Д. А. Кастерин¹, Е. А. Кискин¹, А. А. Стрельцов²
(¹Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск радиоэлектронной борьбы (учебный и испытательный), Россия;
²ФЦНИВТ «СНПО «Элерон», Россия)

АНАЛИЗ ПРАВОВЫХ АСПЕКТОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ОРГАНИЗАЦИИ

Аннотация. Рассматриваются правовые аспекты системы защиты информации в организации, выполнен анализ нормативных документов, а также проведена классификация информации, имеющаяся на ресурсах по степени конфиденциальности.

I. N. Donskikh¹, D. A. Kasterin¹, E. A. Kiskin¹, A. A. Streltsov²
(¹Interspecies Center of Training and Combat use of Electronic Warfare Troops (Training and Testing), Russia;
²FTSNIVT “SNPO” Aileron”, Russia)

ANALYSIS OF LEGAL ASPECTS OF BUILDING THE INFORMATION PROTECTION SYSTEM IN THE ORGANIZATION

Abstract. The article discusses information protection system in the organization, analysis of regulatory documents, as well as classification of information on resources by degree of confidentiality.

Сегодня можно утверждать, что рождается новая современная технология – технология защиты информации в компьютерных информационных системах и в сетях передачи данных. Реализация этой технологии требует увеличивающихся расходов и усилий. Однако все это позволяет избежать значительно превосходящих потерь и ущерба, которые могут возникнуть при реальном осуществлении угроз ИС и ИТ [1].

Развитие новых информационных технологий и всеобщая компьютеризация привели к тому, что информационная безопасность не только становится обязательной, она еще и одна из характеристик ИС. Существует довольно обширный класс систем обработки информации, при разработке которых фактор безопасности играет первостепенную роль (например, банковские информационные системы).

Необходимо проводить своевременное обновление всех средств, входящих в состав системы, следить за корректной работой всех компонентов, предотвращать возможные сбои в работе.

При оценке расчета рисков информации существует необходимость в анализе защищенности и архитектуре построения ИС. Процесс инвентаризации ресурсов – это важный аспект управления рисками внутренней ИБ. На основе полученной информации компания может обеспечить должный уровень конфиденциальности, соответствующий ценности активов. Чаще всего мы говорим о следующих ресурсах:

Во-первых, информационные ресурсы, содержащие конфиденциальную информацию. К ним относятся файлы, базы данных, документация, руководства, заархивированная информация.

Во-вторых, программные ресурсы, обрабатывающие конфиденциальную информацию. Это прикладные программы (MS Word, Adobe Acrobat, Open Office), СУБД (MS SQL, Oracle), средства управления документами (Documentum), а также почтовые системы и проху-сервера, через которые проходит и кэшируется информация [2].

В-третьих, это физические ресурсы, в которых обрабатывается конфиденциальная информация. К ним относятся серверы, рабочие станции, съемные носители, ноутбуки, коммуникационное оборудование.

Система защиты информации в организации должна быть разработана с использованием норм и требований руководящих документов Российской Федерации и законов Российской Федерации в области защиты информации. В организации обязательны следующие нормативные документы по защите информации: «Руководство по защите конфиденциальной информации»; «Устав организации»; «Положение об отделах»; «Положение о порядке организации и проведению работ по защите конфиденциальной информации»; «Руководство по контролю состояния защиты информации»; «Руководство о системах технической защиты информации».

Политика предприятий информационной безопасности предусматривает принятие необходимых мер в целях защиты активов от случайного или преднамеренного изменения, раскрытия или уничтожения, а также в целях соблюдения конфиденциальности, целостности и доступности информации, обеспечения процесса автоматизированной обработки данных [3].

Ответственность за соблюдение информационной безопасности несет каждый сотрудник, при этом первоочередной задачей является обеспечение безопасности всех активов и личной информации клиентов и сотрудников. Это значит, что информация должна быть защищена не менее надежно, чем любой другой основной актив.

Главные цели организации не могут быть достигнуты без своевременного и полного обеспечения сотрудников информацией, необходимой им для выполнения своих служебных обязанностей.

«Положение о порядке обращения со служебной информацией ограниченного распространения» обеспечивает организационную защиту информации, наряду с другими нормативными документами и должностными инструкциями, а также определяет общий порядок обращения с документами и материальными носителями информации, которые содержат информацию ограниченного доступа в организации. Этот документ разработан в организации. В Положении определяется порядок обращения со служебной информацией, определяются ответственные лица, даются рекомендации по защите информации.

В «Положении о порядке организации и проведения работ по защите конфиденциальной информации» определяются обязанности сотрудников, работающих с конфиденциальной информацией и ответственность за ее разглашение, а также порядок обращения с документами, содержащими конфиденциальную информацию, особое внимание уделяется учету электронных документов, которые содержат информацию ограниченного доступа.

В организации создаются должностные инструкции, определяющие действия сотрудников, которые имеют доступ к конфиденциальной информации.

Для определения стоимости информации на ресурсах существует необходимость определить ущерб, который возможно понесет организация при реализации угроз конфиденциальности, целостности и доступности данной информации.

Ущерб задается отдельно по трем угрозам, т.к. оценить ущерб в целом в данном случае невозможно. Ущерб оценивается в уровнях от 1 до 5, первый уровень характеризует наименьший ущерб при реализации угрозы, второй уровень – ниже среднего, третий уровень – средний ущерб при реализации угрозы, четвертый – выше среднего и пятый уровень – наибольший. Например, информация, которая обрабатывается на сервере – персональные данные сотрудников, персональные данные клиентов, бухгалтерские отчеты, данные поставщиков, сведения о доходах организации, внутренние документы сотрудников [4].

Необходимо проводить своевременное обновление всех средств, входящих в состав системы, следить за корректной работой всех компонентов, предотвращать возможные сбои в работе.

Таким образом, система защиты информации представляет собой комплекс программных и технических средств, организационных мер и правовых норм, направленных на противодействие различного вида угрозам защищаемой информации, информационным системам и пользователям.

Список используемых источников

1. Анин, Б. Ю. Защита компьютерной информации / Б. Ю. Анин. – СПб. : БХВ-Санкт-Петербург, 2016. – 384 с.
2. Барсуков, В. С. Современные технологии безопасности / В. С. Барсуков, В. В. Водолазний. – М. : «Нолидж», 2014. – 496 с.
3. Организационно-правовое обеспечение информационной безопасности: учеб. пособие / А. А. Стрельцов, В. С. Горбатов, Т. А. Полякова и др. ; под ред. А. А. Семенов, В. А. Информационная безопасность: учеб. пособие / В. А. Семенов. – М. : МГИУ, 2014. – 215 с.
4. Организационно-правовое обеспечение информационной безопасности : учеб. пособие / А. А. Стрельцов, В. С. Горбатов, Т. А. Полякова и др. ; под ред. А. А. Стрельцова. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 256 с.

Л. А. Маркович

(Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;
Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН,
Москва, Россия;
Российский квантовый центр, Сколково, Россия)

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ MARS ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НАХОЖДЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО РАЗРЕЗА В ГРАФЕ

Аннотация. Предложен новый параллельный алгоритм MARS, основанный на модели Изинга, для решения классических NP-сложных задач комбинаторной оптимизации. MARS показывает отличную производительность как на больших физических системах, так и на множестве эталонных тестов для задачи MAX-CUT.

L. A. Markovich,

(Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
Institute for information transmission problems A. A. Kharkevicha,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
Russian Quantum Center, Skolkovo, Russia)

PARALLEL MARS ALGORITHM FOR SOLVING THE MAXIMUM CUT PROBLEM

Abstract. A new highly parallel MARS algorithm, based on the Ising model, is proposed for solving the classical NP-hard combinatorial optimization problems. MARS shows excellent performance on large physical systems and reference tests for the MAX-CUT problem in terms of both the quality of the solution and the computational time.

1. Введение

Задача нахождения экстремума является парадигмальной проблемой комбинаторной оптимизации. Так, проблема оценки минимальной энергии в модели Изинга (МИ) (нахождение основного состояния) [1], предложенная более сорока лет назад, находится на переднем крае науки. Причина в ее междисциплинарности. В физике МИ характеризуется сложным ландшафтом свободной энергии, который обладает множеством сверхглубоких локальных минимумов. МИ лежит в основе модели нейронной сети Хопфилда, а концепция энергетических долин используется для анализа ее емкости памяти. МИ ис-

пользуется во многих областях информатики, теоретической биологии, экофизики, обработки информации, математики [2]. Простое математическое описание МИ делает ее эталоном в теории сложности, так как любая комбинаторная NP-сложная задача может быть сведена к задаче нахождения минимальной энергии в МИ. Например, она эквивалентна таким комбинаторным задачам оптимизации, как задача коммивояжера (TSP) [3] или задача максимального разреза графа (MAX-CUT) [4]. TSP находит широкий ряд приложений: объединение данных, маршрутизация транспортных средств, передача данных в компьютерных сетях, планирование, сверление печатных плат, анализ структуры кристаллов, кластеризация массивов данных, обработка изображений и распознавание образов. Проблема кластерного анализа, где набор точек данных разбивается на наборы связанных наблюдений, может моделироваться как MAX-CUT. Нахождение минимальной энергии МИ является NP – сложной задачей. Так как общее число состояний для структуры размерности N составляет, то при $N > 30-40$, с вычислительной точки зрения, задача перестает быть решаемой. Таким образом, возможность построения алгоритма, который для любой системы Изинга может найти основное состояние за ряд элементарных операций, которые ограничены полиномиальной функцией от N , является центральной проблемой в вычислительной математике.

В работе предложен новый высокопараллельный метод, называемый *Отжиг среднего поля из случайного состояния* (MARS), для решения задачи поиска максимального разреза графа MAX-CUT и нахождения минимальной энергии МИ. Алгоритм объединяет элементы известного алгоритма *имитационного отжига* (Simulated Annealing) со специальным выбором начальной температуры. При каждом моделировании начальная конфигурация и максимальная температура спуска выбираются случайным образом. Температура ограничена заданным диапазоном. Понижение температуры осуществляется путем решения уравнений поля, что является быстродействующей в вычислительном отношении операцией. Более этого, каждый спуск может быть выполнен отдельно, и алгоритм легко распараллелить. MARS не чувствителен к режиму охлаждения, так как важны только граничные значения случайной начальной температуры. Фактически, имея достаточно мощный компьютерный кластер с большим количеством ядер, можно мгновенно получить необходимую статистику и найти решение проблемы оптимизации за гораздо меньшее время, чем известные в литературе алгоритмы.

Статья организована следующим образом. В Разделе 1 дано краткое введение в теорию модели Изинга как с точки зрения физики, так и комбинаторной оптимизации. В Разделе 2 описан метод имитационного отжига, приведены его сильные и слабые стороны. В Разделе 3 описан предложенный высокопарал-

лельный метод MARS, приведены результаты моделирования и сравнение предложенного метода с эталонными алгоритмами.

2. Модель Изинга

Модель Изинга – математическая модель, предназначенная для описания намагничивания материала. С точки зрения физики в модели Изинга каждому узлу кристаллической решетки соответствует некоторое значение, называемое *спином* и численно обозначаемое 1 или -1 (в литературе также встречаются 0 или 1). Число определяет направление спина «вверх» или «вниз». Каждый атом в магнитном материале подобен магниту, поэтому в решетке все атомы взаимодействуют друг с другом. При высоких температурах атомы находятся в неупорядоченном состоянии, а их спины указывают в случайных направлениях, так что общий магнетизм материала равен нулю. При понижении температуры направления спинов меняются, а ниже определенной температуры атомы выстраивают спины в одном направлении, придавая материалу особые магнитные свойства. Таким образом, модель Изинга описывает переход от случайной конфигурации спинов к упорядоченной, называемой *основным состоянием*. Современная теория спиновых стекол берет свое начало с работы Эдвардса и Андерсона (EA), которые предложили простейший гамильтониан, моделирующий спиновую систему, в котором взаимодействовали только ближайшие друг к другу спины (взаимодействие ближайших соседей). Однако в реальных спиновых стеклах взаимодействуют абсолютно все спины, как бы далеко они не были разнесены в пространстве. Вариант гамильтониана EA с бесконечным диапазоном предложен Шеррингтоном и Киркпатриком (SK). Система из N спинов связана попарным взаимодействием

$$H_N(\sigma) = \sum_i \sum_{j \neq i} J_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_i h_i \sigma_i.$$

Так же модель содержит внешнее поле. Для простоты будем считать его нулевым, но все результаты сохраняются при наличии поля с некоторыми незначительными изменениями.

2.1. Основное Состояние в Модели Изинга с Точки Зрения Физики

В модели SK возникает проблема нахождения конфигурации, соответствующей минимальной энергии системы

$$\min_{\sigma \in \Sigma_N} H_N(\sigma),$$

называемой основным состоянием, и исследование ее термодинамического предела.

2.2. Основное Состояние в Модели Изинга с Точки Зрения Комбинаторной Оптимизации

Большинство задач комбинаторной оптимизации сводятся к задаче нахождения основного состояния МИ. Рассмотрим NP – сложную задачу максимального разреза во взвешенном графе (MAX-CUT). Имеется неориентированный граф $G = (V, E)$, где $V = \{1, \dots, n\}$ – множество вершин, E – множество ребер и матрица весов, связанных с ребрами (i, j) в E . Задача MAX-CUT состоит в том, чтобы найти срез $(S, V \setminus S)$, такой, что сумма весов ребер с одной конечной точкой в S принадлежащей V и другой в $V \setminus S$ максимизируется по всем срезам. Значение разреза может быть записано как

$$J(S, V \setminus S) = \frac{1}{4} \sum_{i,j \in V} J_{ij} - \frac{1}{4} \sum_{i,j \in V} J_{ij} \sigma_i \sigma_j.$$

Здесь спины кодирует, к какому подмножеству принадлежит i -й узел. Значение разреза графа максимизируется, если энергия Изинга минимизирована.

3. Метод Имитационного Отжига

Имитационный Отжиг (Simulated annealing) – метод Монте-Карло, предложенный Метрополисом с температурным спуском, который математически моделируется конечной Марковской цепью. Цепочка Маркова представляет собой последовательность испытаний, где вероятность исхода данного испытания зависит только от исхода предыдущего испытания. В SA испытание соответствует возможному решению, которое должно быть оптимизировано. Множество результатов задается конечным множеством соседних состояний. Каждый ход зависит только от результатов предыдущего шага алгоритма.

Оптимизационный метод SA чрезвычайно чувствителен к температурному режиму: зависит от начальной и конечной температуры, а также от режима ее снижения.

4. Отжиг Среднего Поля из Случайного Состояния

Чтобы преодолеть основную проблему SA-методов – их низкую скорость вычислений, мы вводим высокопараллельный метод, называемый *отжигом среднего поля из случайного состояния* (MARS). В MARS главную роль играет выбор начального значения температуры, выбранной из заданного диапазона. После выбора максимальной температуры, она снижается согласно режиму охлаждения, пока не будет найдено решение. Делая параллельные серии таких спусков, формируется выборка предполагаемых решений, из которых выбирается лучшее.

Algorithm 1 MARS генерирует набор спинов s_i , для модели Изинга (h_i, J_{ij}) .

```

1: for  $t = T_{min}$  to  $T_{max}$  do
2:   for  $i = 0$  to  $N$  do
3:      $s_i := rand(-1, 1)$ 
4:   end for
5:    $T_t := t$ 
6:   while  $T_t > 0$  do
7:      $T_t = T_t - C_{step}$ ;
8:     repeat
9:        $d = 0$ 
10:      for  $i = 0$  to  $N$  do
11:         $\Phi_i = \sum_j J_{ij} s_j$ 
12:         $\hat{s}_i = -\tanh(\Phi_i/T_t)$ 
13:        if  $|\hat{s}_i - s_i| > d$  then
14:           $d = |\hat{s}_i - s_i|$ 
15:        end if
16:      end for
17:       $s_i = \hat{s}_i$ ;
18:    until  $d > d_{min}$ 
19:   end while
20: end for

```

Мы реализуем нашу процедуру на видеопроцессоре Nvidia Tesla V100 для параллельного расчета алгоритма. Несмотря на свою простоту, MARS показывает превосходную производительность на больших спиновых системах Изинга и на множестве известных графов для MAX-CUT с точки зрения, как качества решения, так и времени вычислений. Из эталонных примеров, предложенный алгоритм показал лучшие результаты, чем наиболее известные в литературе алгоритмы.

Таблица 1

Алгоритм	J_N					
	G_{22}		G_{39}		K_{2000}	
	Best (Mean)	Time(m)	Best (Mean)	Time(m)	Best (Mean)	Time(m)
SA	12855. (12751.4)	3.93602	2347. (2299.36)	14.917	31397. (30823.3)	5.38188
NMFA	13344. (13332.3)	9.74812	2372. (2371.98)	36.6222	33259. (33244.3)	13.4483
SimCIM	13335. (13300.6)	9.32855	2358. (2358.)	46.5433	33209. (33209.)	13.2544
MARS	13354 (13122.7)	0.0234	2382 (2310.96)	0.03362	33311 (32039.1)	0.0855

В таблице 1 приведено сравнение MARS с алгоритмами SA, NMFA и SimCIM. Для графов с количеством узлов $V=2000$, которые были сгенерированы *gudu*, независимым генератором графов. Граф G22 является невзвешенным случайным, G39 – невзвешенный планарный граф со случайным весом ребер от -1 до 1 . Третий пример K2000 – полностью связный полный граф.

5. Заключение

Предложен сильнопараллельный алгоритм поиска минимума энергии в полносвязной задаче Изинга. Производительность алгоритма сравнивается с классическим методом имитации отжига и двумя новейшими алгоритмами NMFA и SimCIM. Алгоритм используется для нахождения максимального разреза графа. Приведены примеры графов с различной связностью. На каждом графе MARS показывает лучшие результаты при несравненно меньшем времени, чем SA, NMFA и SimCIM. Таким образом, имея многоядерный компьютер, можно ускорить решение комбинаторных задач больших размеров.

Список используемых источников

1. Edwards, S. Theory of spin glasses / S. Edwards, P. W. Anderson // J. Phys. F. – 1975. – № 5. – С. 965 – 974.
2. Nishimori, H. Statistical Physics of spin Glasses and Information Processing: An introduction / H. Nishimori. – Oxford University Press, 2001.
3. Papadimitriou, C. H. The Euclidean traveling salesman problem is NP-complete / C. H. Papadimitriou // Theor. Comp. Science. – 1977. – № 4(3). – С. 237 – 244.
4. Karp, R. M. Reducibility among Combinatorial Problems / R. M. Karp // Proceedings of a symposium on the Complexity of Computer Computations. – 1972. – С. 85 – 103.

М. С. Рыжов

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

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СЛУЧАЙНОГО ГРАФА ПО ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ СВОЙСТВАМ ВЛИЯТЕЛЬНОСТИ УЗЛОВ

Аннотация. Целью данной работы был поиск связи между значением экстремального индекса (ЭИ) для рассматриваемого узла и структурой связей между узлами случайного графа вокруг. ЭИ вычислялся для последовательностей посчитанных моделью PageRank рангов узлов, полученных для древовидного подграфа с вершиной в рассматриваемом узле с помощью блочной оценки.

**STATISTICAL ANALYSIS OF A RANDOM GRAPH STRUCTURE
BY THE EXTREME PROPERTIES OF NODE IMPORTANCE**

Abstract. The purpose was to find the relationship between the extreme index (EI) value for the current node and the structure of the interrelations between surrounded nodes of the random graph around. EI was calculated for sequences of node ranks calculated by the PageRank model and obtained with a tree-like subgraph with chosen node as a root vertex.

Введение. Наиболее актуальной проблемой в настоящий момент является задача поиска наиболее влиятельных узлов в различных структурах типа графа. В частном случае задача рассматривается для случайных графов, где количество связей между узлами определяется некоторым законом распределения. В качестве меры влиятельности узла чаще всего выбираются ранги, посчитанные методом PageRank [1, 2]

$$R_i = c \sum_{j \rightarrow i} \frac{R_j}{D_j} + (1 - c)q_i, \quad (1)$$

где R_i – ранг i -го узла, D_j – число исходящих из узла j связей, $j \rightarrow i$ – узел j ссылается на узел i , $c \in (0, 1)$ – dumping параметр, в большинстве случаев его значение принимается равным 0,85 [1], q_i – персонализация i -го узла. На практике для расчета используется итеративная форма вида [2]:

$$\hat{R}_i^0 = 1, \hat{R}_i^k = c \sum_{j \rightarrow i} \frac{\hat{R}_j^{k-1}}{D_j} + (1 - c)q_i, \quad (2)$$

где $k > 1$ – номер итерации.

Помимо исследования влиятельности узлов также представляет интерес организация структуры графа. Одна из задач – поиск кластеров, групп узлов, которые связаны между собой сильнее, чем с остальными. Подобные задачи решаются, к примеру, с помощью методов математической статистики.

Стационарный процесс $\{X_n\}_{n \geq 1}$ с функцией распределения $F(x)$ имеет экстремальный индекс (ЭИ) $\theta \in [0, 1]$, если $\forall \tau: 0 < \tau < \infty$ существует последовательность чисел $u_n = u_n(\tau), n \in N$, что выполнено

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n\bar{F}(u_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} n(1 - F(u_n)) = \tau,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(M_n \leq u_n) = e^{-\tau\theta},$$

где $M_{i,j} = \max\{X_i, \dots, X_j\}$, $M_n = M_{1,n}$. На практике для определения ЭИ используют различные оценки, например, блочную оценку [4]:

$$\hat{\theta}_{n,k}(u) = \frac{n \sum_{i=1}^k 1(M_{(i-1)r, jr} > u)}{rk \sum_{i=1}^n 1(X_i > u)} \approx \frac{Z_n}{N_n}, \quad (3)$$

где $r = \lfloor \frac{n}{k} \rfloor$, $k = \overline{1, n}$, Z_n – число блоков наблюдений с хотя бы одним превышением уровня u -кластеров, N_n – число наблюдений, превышающих уровень u . Основным свойством ЭИ является то, что его обратная величина пропорциональна среднему размеру кластера [4], также ЭИ показывает связь предельного распределения максимума измерений с распределением случайной величины [3]

$$P(M_n \leq u_n) \approx (F(u_n))^{n\theta}, n \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Для независимых измерений $\theta = 0$, $\theta = 1$ говорит о сильной зависимости между случайными величинами. Поэтому для каждого узла графа можно ввести ЭИ как меру зависимости его ранга от рангов ближайших узлов. Так как эта зависимость будет определяться наличием и количеством связей в окружающих узлах, то можно говорить, что величина ЭИ также описывает структуру в некоторой области. Исследование такой зависимости является темой данной работы.

Вычисление и анализ экстремального индекса узла графа. Для расчета ЭИ узла графа необходимо построить дерево зависимых узлов [6 – 8], выделив группы узлов (рис. 1). В дальнейшем для набора рангов PageRank узлов, посчитанных (2) и соотнесенных с выделенными группами, можно применить блочную оценку (3). Полученное значение будет называть ЭИ для узла дерева. Размер дерева выбирается таким образом, чтобы при его увеличении ЭИ рассматриваемого узла оставался неизменным.

Важным моментом является момент определения групп узлов (в дальнейшем будем именовать их блоками) для последующего расчета ЭИ. Это можно сделать несколькими способами:

- Блок потомков – группа узлов, связанная с одним и тем же узлом-родителем. (рис. 1, слева);
- Блок последовательности – группа узлов, последовательно соединенных друг с другом. Концом или началом такой последовательности являются узлы, которые имеют более одной исходящей или входящей связи соответственно (рис. 2, справа).

Для разных моделируемых графов с помощью метода FireForestModel [5] была получена связь ЭИ узла θ_b и усредненного размера блоков b в дереве для выделенных блоков потомков [8]. В предыдущей работе из этого было найдено несколько типов узлов:

1. $\theta_b < 0,5$, $\theta_b \approx \frac{1}{b}$ – случай сильной зависимости от большого количества узлов в блоке;

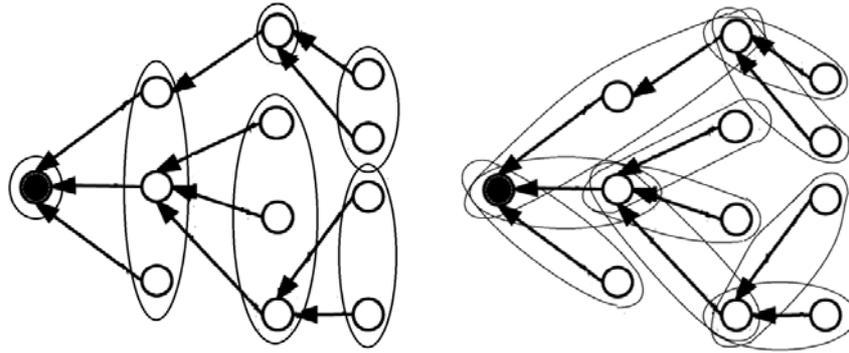


Рис. 1. Пример построения дерева зависимых узлов от узла, для которого вычисляется ЭИ (выделен черным). В одну группу собраны узлы, образующие блок в дереве. Слева представлены блоки потомков, справа представлены блоки последовательностей

2. $\theta_b \geq 0,5, \theta_b \approx 1 - \frac{1}{b}$ – случай слабой зависимости от большого количества узлов в блоке;
3. $\theta_b \geq 0,5, \theta_b \approx \frac{1}{b}$ – случай слабой зависимости от малого количества узлов в блоке.

Аналогично было проведено исследование ЭИ узла θ_l для блоков последовательностей. Было получено, что при последовательном увеличении дерева зависимых узлов ЭИ θ_b удовлетворяет условию

$$\frac{1}{b} \leq \theta_b \leq \theta_l. \quad (5)$$

Нижняя граница ЭИ θ_b соответствует случаю, когда влияние узла в большой степени от влияния связей окружающих узлов связей между собой. В то же время верхняя граница соответствует случаю, когда влияние определяется влиятельностью других узлов в независимости от наличия связей между ними.

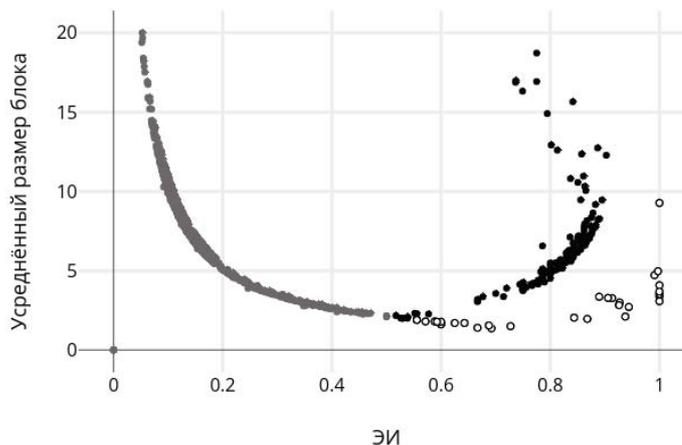


Рис. 2. График зависимости ЭИ узлов от усредненного размера блока потомков. Серым, черным и белым цветом выделены узлы, относящие к классу первого, второго и третьего типа соответственно

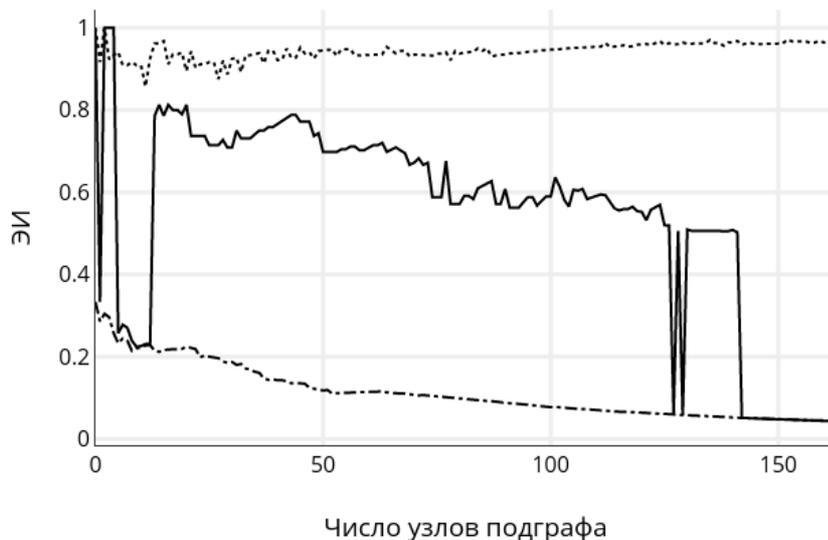


Рис. 3. График зависимости ЭИ узла от количества узлов в дереве зависимых узлов. Сплошная и точечная линии соответствуют ЭИ для блоков потомков и для блоков последовательностей соответственно. Пунктирная линия соответствует обратному значению усредненного размера блоков в дереве для случая блоков потомков

Заключение. В работе представлены зависимости ЭИ узла от параметров случайного графа. Результаты показывают, что величина ЭИ описывает структуру графа в некоторой области вокруг исследуемого узла и характер зависимости влияния узла от его окружения.

Список используемых источников

1. Brin, S. The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine, Computer Networks and ISDN Systems / S. Brin, L. Page. – 1998. – P. 107 – 117.
2. Volkovich, Y. On the exceedance point process for a stationary sequence, Advances in Applied Probability / Y. Volkovich, N. Litvak. – 2010. – P. 577 – 604
3. Leadbetter, M. R. Extremes and local dependence in stationary sequences, Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete / M. R. Leadbetter. – 1983. – P. 291 – 306.
4. Beirlant, J. Statistics of Extremes: Theory and Applications, Wiley, Chichester, West Sussex / J. Beirlant, Y. Goegebeur, J. Teugels, J. Segers. – 2004.
5. Leskovec, J. Community Structure in Large Networks : Natural Cluster Sizes and the Absence of Large / J. Leskovec, K. J. Lang, A. Dasgupta, M.W. Mahoney. – 2008.
6. Markovich, N. M. Nonparametric Analysis of Extremes on Web Graphs: PageRank versus Max-Linear Model, DCCN-2017 / N. M. Markovich, M. S. Ryzhov, U. R. Krieger ; Moscow 25 – 29, September 2017. – M., 2017.

7. Markovich, N. M. Statistical Clustering of a Random Network by Extremal Properties, DCCN-2018 / N. M. Markovich, M. S. Ryzhov, U. R. Krieger ; Moscow 17 – 21, September 2018.

8. Рыжов, М. С. Классификация узлов случайного графа по экстремальным свойствам влиятельности : 61-я Научная конференция / М. С. Рыжов, Н. Маркович ; МФТИ, Москва 19 – 25 ноябрь 2018. – М., 2018.

Д. А. Елфимова

(Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия)

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИЗНОСА ВАЛКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СЖАТИЯ

Аннотация. Проводится исследование и анализ методов сжатия, которые включают в себя метод Ридж-регрессии (ridge regression), метод Лассо (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) и метод эластичной сети (Elastic Net), а также построение моделей износа валков при помощи этих методов.

D. A. Elfimova

(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL ROLL WEAR MODELS WITH THE USE OF SHRINKAGE METHODS

Abstract. This article conducts research and analysis of Shrinkage Methods that include Ridge regression, LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator), and Elastic Net, as well as use them to create mathematical roll wear models.

Актуальность. Современные технологические процессы, в том числе и металлургические, не могут совершенствоваться без математического моделирования. Математическое моделирование дает нам способ упрощения наблюдаемых явлений и позволяет прийти к доступным вычислительным описаниям. Методы сжатия способны создавать более точные модели, чем принятый в использовании метод наименьших квадратов.

Обзор методов сжатия. Регрессия по методу наименьших квадратов (МНК) часто может стать неустойчивой, т.е. сильно зависящей от обучающих данных, что обычно является проявлением тенденции к переобучению. Избежать такого переобучения помогают методы сжатия [1] – методы, которые накладывают штрафы на искомые параметры. Смысл процедуры заключается в «сжатии» вектора коэффициентов в ходе построения модели таким образом,

чтобы они в среднем оказались несколько меньше по абсолютной величине, чем это было бы при МНК.

При сжатии (также известном как регуляризация) некоторые из оценок коэффициентов могут быть приравнены к нулю. Следовательно, методы сжатия также могут использоваться в качестве методов отбора информативных факторов [2]. Однако прежде чем перейти к моделям методов сжатия, следует разобрать также и метод наименьших квадратов.

МНК. МНК является самым распространенным и теоретически обоснованным методом определения оценки параметров множественной линейной регрессии, при котором минимизируется сумма квадратов отклонений $\sum_{i=1}^n e_i^2$.

Уравнение множественной регрессии имеет следующий вид:

$$Y = f(\beta, X) + \varepsilon, \quad (1)$$

где $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ – вектор независимых переменных (факторов); $B = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$ – вектор параметров; ε – случайная ошибка; Y – зависимая переменная (отклик).

В методе наименьших квадратов оценивается эмпирическое уравнение регрессии, где значения параметров B и ошибка ε заменяется оценками \hat{B} и e .

Вектор МНК-оценок рассчитывается следующим образом [3]:

$$\hat{B} = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (2)$$

Однако нередко встречаются данные, при исследовании которых полученная матрица $X^T X$ оказывается близка к вырожденной, небольшое изменение исходных данных приводит к существенному изменению МНК-оценок. Чтобы уменьшить данный недостаток и используются методы сжатия.

Ридж-регрессия. В случае мультиколлинеарности МНК-оценка неустойчива и, чтобы изменить получаемые модели в лучшую сторону, используется Ридж-регрессия, впервые введенная А. Гоэрлом (1962) [4]. В общем виде Ридж-оценка неизвестного вектора в линейной регрессионной модели определяется следующим образом [5]:

$$\tilde{B} = (X^T X + \Lambda)^{-1} X^T Y, \quad (3)$$

где Λ – неотрицательно-определенная матрица $m \times m$, которая часто определяется как $\Lambda = \lambda E$ ($\lambda > 0$ – параметр сжатия, а E – единичная матрица).

Условие минимизации квадратов ошибки при Ридж-оценке параметров в координатной записи выражается следующей формулой:

$$\hat{b} = \arg \min \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^m b x_{ij})^2 + \lambda \sum_{j=1}^m (b)^2 \right]. \quad (4)$$

Ридж-регрессия не может производить модель с малым количеством коэффициентов, поскольку она всегда сохраняет все предсказатели модели. Кроме того, Ридж-оценку можно считать МНК-оценкой с ограничением нормы возможных решений, т.к. при значении параметра регуляризации $\lambda = 0$, гребневая регрессия сводится к методу наименьших квадратов.

Регрессия LASSO. Метод регрессии «Лассо» также заключается во введении дополнительного штрафа сжатия в функционал оптимизации модели для улучшения устойчивости решения.

Перспективный метод Лассо был предложен Р. Тибширани (1996) [6]. Лассо накладывает штраф нормы L_1 на коэффициенты регрессии. Из-за характера L_1 штрафа, Лассо делает непрерывное сжатие и автоматический отбор переменных одновременно. Так как отбор информативных факторов приобретает все большее значение в современном анализе данных, Лассо считают гораздо более привлекательным в силу своего разреженного представления.

Условие минимизации квадратов ошибки при Лассо-оценке параметров выражается следующей формулой:

$$\hat{b} = \arg \min \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^m b x_{ij})^2 + \lambda \sum_{j=1}^m |b| \right]. \quad (5)$$

Регрессия эластичной сети. Обобщением регрессии с регуляризацией можно считать модель эластичной сети, созданную Х. Цзоу и Т. Хасты (2005) [7]. Подобно Лассо, эластичная сеть одновременно выполняет автоматический отбор факторов и постоянное сокращение их количества, также она может выбирать группы коррелированных переменных, что похоже на растягивающуюся рыболовную сеть, которая удерживает и сохраняет всю «крупную рыбу».

Эта модель устанавливает сразу два типа штрафных параметров и объединяет Ридж-регрессию (при $\lambda_2 = 0$) и регрессию Лассо (при $\lambda_1 = 0$):

$$\hat{b} = \arg \min \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^m b x_{ij})^2 + \lambda_1 \sum_{j=1}^m |b| + \lambda_2 \sum_{j=1}^m (b)^2 \right]. \quad (6)$$

Результаты работы. Был написан скрипт на программном языке R для построения моделей износа валков по вышеуказанным методам с использованием сведений из литературы [8, 9]. В данных моделях были приняты следующие обозначения.

- wear – износ. В данном случае это разность между диаметрами валков до перешлифовки и после;
- time – время от начала завалки до вывалки, ч;
- num – номер клетки;
- km – количество прокатанного металла, км;
- weight – вес валка, кг;

- depth – глубина рабочего слоя, мм (паспорт.);
- hardness – твердость валка, ед. Шора (паспорт.).

При реализации методов построения математических моделей были использованы данные в количестве 200 строк, избавленные от выбросов и разделенные на обучающую и тестовую выборки. Параметр регуляризации λ выбирался встроенным пакетом одним из рекомендуемых способов.

Полученные с помощью скрипта модели:

- МНК

$$2.3125573 + 0.0019163 \cdot \text{time} - 0.0003687 \cdot \text{km} - 0.0002376 \cdot \text{weight} - 0.0049518 \cdot \text{depth} + 0.0094364 \cdot \text{hardness} + 0.0523599 \cdot \text{num}$$

- Ridge ($\lambda=0.008450387$)

$$1.6376992892 - 0.0004016341 \cdot \text{km} + 0.0019801771 \cdot \text{time} - 0.0001667439 \cdot \text{weight} - 0.0043866459 \cdot \text{depth} + 0.0064702098 \cdot \text{hardness} + 0.0499857705 \cdot \text{num}$$

- LASSO ($\lambda=0.009061073$)

$$0.24839301 + 0.00952032 \cdot \text{num}$$

- Elastic Net ($\lambda_{1,2}=0.07315942$)

$$0.24720527 + 0.009624356 \cdot \text{num}$$

Средне-квадратичная ошибка, вычисленная по тестовым данным:

МНК	0.01108712
Ridge	0.01108605
LASSO	0.01107288
Elastic net	0.011099657

Выводы. Несмотря на избавление от большинства факторов при построении модели износа валков, метод эластичной сети показал себя лучше всего, при этом другие методы сжатия также показали себя лучше МНК, что доказывает их пользу на реальных данных и не противоречит теоретическим исследованиям. Кроме того, модели Лассо и эластичной сети наглядно показали, что значимых переменных с использованием этих данных получилось очень и очень немного, что означает необходимость исследования иных факторов износа либо взятие другого параметра для его определения.

Список используемых источников

1. Воронцов, К. В. Лекции по алгоритмам восстановления регрессии / К. В. Воронцов. – 2007. – 37 с.
2. Gareth, J. An Introduction to Statistical Learning with Applications in R. Springer Texts in Statistics / J. Gareth, D. Witten, T. Hastie and R. Tibshirani. – New York : Springer Science, 2013. – 426 с.

3. Бородич, С. А. Вводный курс эконометрики : учебное пособие / С. А. Бородич. – Мн. : БГУ, 2000. – 354 с.
4. Hoerl, A. Application of ridge analysis to regression problems. Chemical Engineering Progress / A. Hoerl // Chemical Engineering Progress. – 1962. – № 58. – С. 54 – 59.
5. Демиденко, Е. Линейная и нелинейная регрессии / Е. Демиденко. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 304 с.
6. Tibshirani, R. Regression selection and shrinkage via the lasso / R. Tibshirani // J. R. Stat. Soc. Ser. B. – 1996. – № 58. – С. 267 – 288.
7. Zou, H. Regularization and variable selection via the elastic net // Journal of the Royal Statistical Society / H. Zou, T. Hastie. – 2005. – 67(2). – С. 301 – 320.
8. Шитиков, В. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R / В. Шитиков, С. Мастицкий. – Тольятти, Лондон, 2017. – 351 с. – URL : <https://github.com/ranalytics/data-mining>.
9. Кабаков, Р. И. R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R / Р. И. Кабаков. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 588 с.

К. А. Федутин

(Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия)

МОДИФИКАЦИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ FUZZY ARTMAP В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ КЛАССОВ

Аннотация. Как известно, алгоритм Fuzzy ARTMAP плохо работает с пересекающимися распределениями классов, часто встречающихся в реальных данных. Описывается несколько модификаций, которые устраняют проблему распространения основной категории.

K. A. Fedutin

(Voronezh State University, Voronezh, Russia)

MODIFICATION OF THE NEURAL NETWORK FUZZY ARTMAP IN TERMS OF INTERSECTING CLASSES

Abstract. As you know, Fuzzy ARTMAP algorithm does not work well with overlapping distributions of classes often found in real data. This article describes several modifications that address the distribution problem of the main category.

При управлении большими системами, как правило, возникают задачи адаптивной классификации объектов управления для последующего выбора управляющих воздействий в рамках генерируемых подсистем.

Классификация – это процесс присвоения набору входных данных метки одного из нескольких предварительно определенных классов. Если пространство входных данных не может быть подразделено на области с отдельными метками классов, говорят, что базовые классы распределения пересекаются. Эта ситуация часто встречается в реальных задачах из-за шума, неопределенности классификации и ошибок, использования неоптимальных входных характеристик, потери контекста и так далее. Классификация точек из пересекающихся распределений классов – это более сложная проблема, чем классификация точек из разделимых распределений. Невозможно однозначно классифицировать точку, лежащую в области перекрытия классов. Лучшее, что может сделать классификатор – это оценить вероятность того, что такая точка принадлежит определенному классу или определить нечеткое значение принадлежности точки данному классу [1]. Если вывод классификатора ограничен одной меткой, то наиболее общий подход заключается в выборе одного класса, из которого точка, скорее всего, была взята.

Нечеткая сеть ARTMAP [2] обычно используется для построения классификатора в режиме обучения с учителем. В этом случае она состоит из одного модуля Fuzzy ART и модуля контролируемой классификации MAP. Во время обучения на вход сети подаются обучающие векторы, размеченные в соответствии с классами, к которым они принадлежат. Модуль Fuzzy ART назначает текущему входному вектору определенную категорию (как правило, каждому классу соответствует несколько категорий близких в смысле некоторого критерия сходства векторов). Поле MAP связывает каждую категорию с определенным классом. Если метка класса обучающего вектора отличается от класса, связанного с выбранной категорией, поле MAP повторно вызывает поиск модуля Fuzzy ART, на этот раз с ограничением внимания на оставшиеся категории. Если эта процедура, называемая отслеживанием совпадений, успешно присваивает входному вектору категорию с правильной меткой класса, веса, определяющие эту категорию, обновляются, что повышает вероятность повторного отнесения этого обучающего вектора к данной категории в будущем. Если категория с правильной меткой класса не найдена, для данного входного вектора создается новая категория.

Когда распределения данных, связанных с несколькими классами, перекрываются, Fuzzy ARTMAP имеет тенденцию создавать отдельную категорию для каждого набора данных из пересечения классов. Это явление называется распространением категории. Это является прямым результатом того факта, что классы не являются разделяемыми. Хотя это приводит к правильной классификации обучающих векторов, производительность на тестовых данных (т.е. обобщение) такой сети часто хуже, чем сети с меньшим числом категорий. Кроме того, время, необходимое для поиска Fuzzy ARTMAP, и память, необходимая для хранения весовых коэффициентов, пропорциональны количеству ка-

тегорий, что обеспечивает дополнительные стимулы для ограничения количества создаваемых категорий.

Рассмотрим несколько возможных вариантов модификации сети Fuzzy ARTMAP.

1. *Обрезка*. Если категории, которые содержат наименьшее количество обучающих векторов, периодически удалять, число используемых категорий приблизится к стационарному значению. Оставшиеся категории будут увеличивать, чтобы захватить обучающие векторы, которые были ранее отнесены к удаленным категориям.

2. *Ограничение на создание новых категорий*. Скорость создания новых категорий может быть ограничена. Например, если один и тот же набор данных предъявляется многократно во время обучения, количество категорий, создаваемых во время каждой эпохи обучения, может быть ограничено некоторым значением, например, общим количеством классов. Это приводит к максимально возможному росту существующих категорий, что в целом сокращает общее количество сформированных категорий.

3. *Двунаправленное движение веса*. Правило обучения сети Fuzzy ARTMAP гарантирует, что сформированные категории со временем только растут и никогда не уменьшаются [2]. Следовательно, после достаточного числа итераций, каждая точка обучающей выборки будет лежать либо внутри, либо на границе категории, которая ее захватывает. Причем, как известно, геометрически сформированная категория сети Fuzzy ARTMAP представляет собой многомерный параллелепипед в пространстве признаков, т.е. в процессе классификации пространство входных векторов покрывается n -мерными «параллелепипедами» выделенных категорий [3]. Весовой вектор хранит «прототип» каждой категории. В качестве модификации предлагается обновлять только те компоненты весового вектора, для которых соответствующие компоненты входного вектора попали в границы распознанной категории. В формуле (1) W – матрица весов, w_{ji} – i -я компонента весового вектора-прототипа J -й категории w^J , I – входной вектор. При этом учитывается что входы, как требует сеть Fuzzy ARTMAP, закодированы с помощью комплементарного кодирования: M -мерный вектор превращается в $2M$ -мерный путем дополнения его M компонентами $I_{i+M} = 1 - I_i$.

$$w_{ji}^{new} = \begin{cases} w_{ji}^{old}, & w_{Jcomp} \geq I_{comp}; \\ w_{ji}^{old} - \beta(w_{ji}^{old} - I_i), & w_{Jcomp} < I_{comp}, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$w_{Jcomp} = w_{J(i-M)} \text{ и } I_{comp} = I_{i+M}, \text{ если } i \leq M, \text{ и}$$

$$w_{Jcomp} = w_{J(i-M)} \text{ и } I_{comp} = I_{i-M}, \text{ если } i > M.$$

При использовании такого способа пересчета весовых коэффициентов категория растет вдоль размерностей, в которых компонент входного вектора лежит за границами параллелепипеда, соответствующего распознанной категории, и сжимается вдоль размерностей, в которых компонент входного вектора лежит внутри существующего параллелепипеда. Это приводит к уменьшению размеров категорий, и позволяет лучше приближать формы оптимальных границ принятия решений между пересекающимися распределениями классов. Однако без сокращения или ограничения создания новых категорий двунаправленное движение веса часто приводит к появлению большого количества категорий. Таким образом, для того, чтобы двунаправленные движения веса были полезными, следует использовать один из вышеуказанных способов ограничения количества категорий.

4. *Перемаркировка категорий.* Если функция соответствия $S_J(I)$ близка к единице (т.е. расстояние от входного вектора I до весового вектора категории J не превосходит некоторого порогового значения ρ_J), и все же классы, связанные с категорией J и обучающим вектором I , отличаются, стандартная Fuzzy ARTMAP создает новую категорию, что приводит к росту числа категорий. Вместо этого можно разрешить такой категории быть связанной с несколькими классами, т.е. метка класса для такой категории будет иметь тип запись, состоящую из нескольких полей. Когда тестовый вектор захватывается такой категорией, можно назначить вектору нечеткое членство в каждом из классов или вывести одну метку класса на основе относительных величин соответствия каждому из классов. При этом необходимо уменьшить вероятность того, что категория, связанная с несколькими классами, захватит точку, которая может быть однозначно отнесена к одному классу (п. 5).

5. *Функция выбора, предпочитающая большие категории.* При использовании исходной функции выбора для сети Fuzzy ARTMAP, если входной вектор данных попадает в оба из перекрывающихся весовых параллелепипедов категорий, побеждает меньший параллелепипед [2]. Это гарантирует, что категория, созданная в ответ на некоторый входной вектор, захватит этот вектор, если он будет когда-либо заново предъявлен на вход сети. Кроме того, если точка данных находится посередине между двумя имеющимися параллелепипедами категорий, побеждает меньший. Второе свойство имеет нежелательные последствия. Интуитивно понятно, что маленький весовой параллелепипед получается из очень локализованного набора тренировочных точек, тогда как большой весовой параллелепипед получается из разбросанного набора тренировочных точек. Если контрольная точка находится на одинаковом расстоянии от двух параллелепипедов, она удалена на большее число стандартных отклонений от меньшего параллелепипеда, чем от большего, и поэтому должна быть назначена последнему. Предлагаемая функция альтернативного выбора (2) обеспечивает подобную классификацию:

$$T_J(I) = |w^J| \left(1 + \frac{|I \wedge w^J| - |w^J|}{\alpha} \right). \quad (2)$$

Как и в функции выбора сети Fuzzy ARTMAP [2], α является малой константой, но в данном случае α определяет диапазон, в котором параллелепипед большего размера предпочтительнее меньшего. Оператор \wedge определяется как $(p \wedge q)_i = \min(p_i, q_i)$, а норма $|p| = \sum_i p_i$. Величина $T_J(I)$ может быть меньше 0. При этом значение $|w^J|$ будет вычисляться только при обновлении весов категории J .

Можно показать, что предлагаемая функция (2) удовлетворяет требованиям к функции выбора, сформулированным в работе [4].

1) Обновление веса w^J в ответ на входной вектор I увеличивает $T_J(I)$.

2) Если входной вектор находится внутри двух перекрывающихся параллелепипедов, меньший параллелепипед соответствует большему значению функции выбора.

3) Значение функции выбора монотонно уменьшается с увеличением расстояния входного вектора весового параллелепипеда.

В процессе численного эксперимента отмечено увеличение производительности модифицированного алгоритма по сравнению с базовой сетью Fuzzy ARTMAP в тестах с наборами данных различной размерности и различной степени перекрытия между распределениями классов.

Список используемых источников

1. Carpenter, G. A. & Grossberg, S. (2003), Adaptive Resonance Theory, In Michael A. Arbib (Ed.), The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, Second Edition (pp. 87-90). Cambridge, MA: MIT Press.

2. Carpenter G. A., Grossberg S., Markuzon N., Reynolds J. H., Rosen D. B. Fuzzy ARTMAP: An adaptive resonance architecture for incremental learning of analog maps // Proc. of the Int. Joint Conf. on Neural Network. – 1992.

3. Каширина, И. Л. Нейросетевое моделирование формирования кластерной структуры на основе сетей ART / И. Л. Каширина, Я. Е. Львович, С. О. Сорокин // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 228 – 232.

4. Каширина, И. Л. Кластеризация непрерывного потока данных на основе обобщенной модели нейронной сети семейства ART / И. Л. Каширина, К. А. Федутин // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – Т. 71, № 1. – С. 33 – 39.

5. Каширина И. Л. Применение сети Fuzzy ARTMAP в интеллектуальных системах обнаружения вторжений / И. Л. Каширина, К. А. Федутин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т. 6, № 3 (22). – С. 243 – 257.

Д. В. Поляков

(Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия)

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ КОЛЛОКАЦИЙ

Аннотация. Рассматривается понятие нечеткой коллокации и ее использование в кластеризации текстовых коллекций и семантическом анализе текстовых документов. Предлагается подход к построению функций принадлежности нечетких коллокаций на основе эволюционного алгоритма с использованием *SVD*-разложения для вычисления функции приспособленности.

D. V. Polyakov

(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

A CREATING INTELLECTUAL INFORMATION SYSTEMS FOR SEMANTIC ANALYSIS OF TEXT INFORMATION BASED ON FUZZY COLLOCATIONS

Abstract. The article considers the concept of fuzzy collocation and its use in clustering text collections and semantic analysis of text documents. An approach for creating membership functions of fuzzy collocations based on the evolutionary algorithm using *SVD* decomposition to calculate the fitness function is proposed.

В современном мире задачи, связанные с управлением, сложно себе представить без постоянного доступа к актуальной информации. Автоматизация получения и анализа требуемой информации приводит к минимизации объема и значимости ошибок в процессе управления большими системами. Не последнюю роль в такой автоматизации играет задача семантического анализа текстовой информации. Он позволяет принимать корректные решения на базе актуальной информации в автоматическом режиме. Рассмотрим подробнее задачу семантического анализа коллекции текстовых документов. Одним из известных и хорошо себя зарекомендовавших методов такого анализа является латентный семантический анализ [1]. Данный метод основан на *SVD*-разложении [2] матрицы мер *tf – idf*, представляющей собой векторно-пространственную модель текстовой коллекции, сформированной на основе частот термов.

Вместе с тем имеет место некоторая робастность информационных систем, использующих эту модель. Она связана с тем, что при формализации текстовой коллекции в виде матрицы *tf – idf* теряется информация, заложенная в связях между термами. Действительно, если взять тексты некоторой коллекции, осуществить лемматизацию всех слов, т.е. привести их к одной и той же слово-

форме, назовем ее термом (например, прилагательные приводятся к именительному падежу, мужскому роду и единственному числу), а потом перемешать термы произвольным образом, то, с точки зрения человека, получатся нечитаемые бессмысленные тексты. А вот в рамках векторно-пространственной модели новая коллекция будет формализована в виде матрицы $tf - idf$, идентичной аналогичного представления изначальной коллекции.

Для того чтобы снизить робастность представления в виде $tf - idf$, была предложена обобщенная векторно-пространственная модель, в которой кроме термов учитываются их нечеткие коллокации [3]. Гипотеза заключалась в том, что семантическую нагрузку в тексте могут нести не только терм или последовательность термов, но и группа термов, расположенная на некотором расстоянии друг от друга. Такая группа термов была названа коллокацией. Вместе с тем, в литературе [4, 5] в качестве коллокаций зачастую выступает группа термов, непосредственно располагающихся рядом в текстовом документе. Для формализации коллокаций с учетом расстояний между термами в них, было предложено воспользоваться теорией нечетких множеств. Коллокация, расстояния между термами в которой заданы нечеткими числами, была названа нечеткой коллокацией [3, 6]. Под расстоянием между термами в коллокации понимается количество термов, не принадлежащих коллокации, находящиеся между термами, принадлежащими коллокации. На данном этапе исследований ограничимся рассмотрением коллокаций, состоящих из двух термов.

Пусть τ – множество всех лемматизированных термов, а $\mu: R \rightarrow [0,1]$ – функция принадлежности, формализующая расстояние между термами, тогда нечеткая коллокация(c) задается кортежем:

$$c = \langle t_1, t_2, \mu \rangle, \quad (1)$$

где $t_1, t_2 \in \tau$.

Так как $0 \leq \mu(x) \leq 1, \forall x \in R$ и, в общем и целом, она монотонна, а именно: два терма в меньшей степени составляют коллокацию, если расстояние между ними возрастает, а при некотором расстоянии между термами их вообще нельзя отнести к коллокации [7, 8]. Тогда функцию принадлежности из (1) удобно задавать в виде:

$$\mu(x) = \min \{1, \max \{0, f(x)\}\} \forall x \in R, \quad (2)$$

где $f(x) \downarrow$ на R . Приняв во внимание (2), коллокацию (1) удобно задать как

$$c = \langle t_1, t_2, f(x) \rangle, \quad (3)$$

где $t_1, t_2 \in \tau$, а $f(x) \downarrow$ на R .

Гипотеза нечетких коллокаций состоит в том, что в семантически близких текстовых документах термы склонны появляться на определенном нефиксированном расстоянии друг от друга.

Проведены исследования, в результате которых построена обобщенная векторно-пространственная модель текстовой коллекции (ОВПМТК). В рамках ОВПМТК текстовые документы отображаются на пространство факторов, заданных, в общем случае, нечеткими множествами [3]. Данная модель позволила посредством *SVD*-разложения оценить семантическую значимость коллокаций в сравнении с терминами. Проведены вычислительные эксперименты, позволившие выявить и оценить семантическую значимость ряда коллокаций. Вычислительные эксперименты проводились на коллекции из 453 текстов, включающих в себя 6 176 763 слов, лемматизированных к 13 012 терминам [9]. По результатам экспериментов выявлен ряд нечетких коллокаций с высокой семантической значимостью. Примеры таких коллокаций представлены в табл. 1.

1. Примеры наиболее семантически значимых нечетких коллокаций

t_1	t_2	$f(x)$
работа	датчик	$-0,25x + 2,25$
программа	ситуация	$-0,333x + 2,667$
система	интерфейс	$-0,2x + 2$
транзистор	испытывать	$-0,167x + 1,667$
транзистор	использовать	$-0,143x + 1,429$
связь	документ	$-0,125x + 1,25$

При этом термины, получившие наибольшую семантическую значимость, такие, например, как «автоматизировать», «аппаратура», «база», «блок» не вошли в состав наиболее значимых коллокаций, что свидетельствует о самобытности и независимой семантической значимости последних.

Вместе с тем, проблемой остается построение функции принадлежности, при которой нечеткая коллокация имеет максимальную семантическую значимость. В выше упомянутых вычислительных экспериментах было поставлено необоснованное ограничение, что $f(x)$ – прямая. Проблему построения функции принадлежности, максимизирующую семантическую значимость коллокации усугубляет, с одной стороны, чрезвычайно широкий класс допустимых для $f(x)$ функций, а с другой стороны – метод расчета семантической значимости, связанный с численными методами *SVD*-разложения матриц большой размерности, т.е. максимизируемая функция не имеет аналитического вида и рассчитывается посредством алгоритма. Решение данной задачи возможно лишь полным перебором, что представляется крайне вычислительно сложным, либо эвристическим алгоритмом. Среди эвристик для решения подобной задачи выде-

ляется семейство эволюционных алгоритмов [10]. Данные алгоритмы предполагают наличие группы решений (популяции), для которых рассчитывается функция приспособленности (*Fitness*). Собственно на максимизацию этой функции и направлены эволюционные алгоритмы. После расчета *Fitness* выполняется ряд действий, имитирующих эволюционные процессы живой природы [10] и, по итогам получаем новую группу решений с улучшенным значением *Fitness*.

В нашем случае максимизируемым значением является сингулярное число, полученное в результате *SVD*-разложения и определяющее семантическую значимость нечетких коллокаций. Так как каждым решением в популяции является коллокация конкретного вида, которой, в свою очередь, соответствует строка матрицы $tf-idf$ и, по итогам *SVD*-разложения сингулярное число, то значение *Fitness* для всей популяции ищется в процессе одного сингулярного разложения. Это позволяет существенно повысить скорость работы эволюционного алгоритма в контексте задачи построения функции принадлежности.

В дальнейших исследованиях планируется выбрать эволюционный алгоритм, и провести новые вычислительные эксперименты, в которых с помощью выбранного алгоритма можно будет построить функции принадлежности для коллокаций с высокой семантической значимостью.

Список использованных источников

1. Ландэ, Д. В. ИНТЕРНЕТИКА: Навигация в сложных сетях: модели и алгоритмы / Д. В. Ландэ, А. А. Санарский, И. В. Безсуднов. – М. : ЛИБРОКОМ, 2009. – 264 с.
2. Jia, Y. B. Singular Value Decomposition / Y. B. Jia // USA:ComNotes. – 2015. – № 477. – С. 1 – 9.
3. Поляков, Д. В. Обобщение векторно-пространственной модели для оценки семантической значимости характеристик текстовых документов / Д. В. Поляков, Н. М. Митрофанов, Е. Н. Лепешкина // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 2 – С. 51 – 61.
4. Савина, А. Н. Исследование коллокаций с помощью экспериментов с информантами / А. Н. Савина, Е. В. Ягунова // Корпусная лингвистика–2011 : труды международной конференции ; С.-Петербургский гос. университет, Филологический факультет. – СПб., 2011. – С. 1 – 7.
5. Пивоварова, Л. М. Извлечение и классификация терминологических коллокаций на материале лингвистических научных текстов / Л. М. Пивоварова, Е. В. Ягунова // материалы Симпозиума «Терминология и знание» М., 2010. – С. 21 – 34.

6. Поляков, Д. В. К вопросу о построении информационной системы метапоиска и мониторинга сведений в сети Интернет на основе нечеткого представления коллокаций / Д. В. Поляков // Сборник научных работ Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области информатики и информационных технологий. Т. 1. – Белгород : БелГУ, 2011 – С. 419 – 424.

7. Поляков, Д. В. Метод формализации нечетких коллокаций термов в текстах на основе лингвистических переменных / Д. В. Поляков, Н. М. Митрофанов, А. С. Матвеева // Управление и высокие технологии. – 2015. – № 4(32) – С. 167 – 183.

8. Поляков, Д. В. Метод формализации нечетких коллокаций на основе фазсификации расстояний между термами в текстах / Д. В. Поляков, С. А. Дузькрятченко, А. И. Елисеев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2015. – № 12. – С. 50 – 61.

9. Оценка семантической значимости нечетких коллокаций на основе обобщенной векторно-пространственной модели текстовой коллекции / Д. В. Поляков, А. И. Попов, А. С. Матвеева, П. И. Карасев, Д. А. Балюков // Управление и высокие технологии. – 2016. – № 1(33). – С. 167 – 183.

10. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : Физматлит, 2003. – 432 с.

Ю. В. Минин

(Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия)

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ РАЗРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Рассмотрен вопрос актуальности научных исследований, посвященных разработке математического аппарата разработки и анализа информационных систем, находящихся под влиянием негативных внешних воздействий.

Yu. V. Minin

(Tambov State Technical University, Tambov, Russia)

METHODS AND MODELS OF DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF INFORMATION SYSTEMS

Abstract. The issue of relevance of scientific research on the development of a mathematical apparatus for the development and analysis of information systems under the influence of negative external influences is considered.

Современный мир сложно представить без современных автоматизированных систем обработки данных, применяемых во всех областях деятельности.

В последние два десятилетия наблюдается резкий рост объемов циркулирующих разнородных данных в информационных системах (ИС), а также интенсивность их передачи между ее элементами с целью достижения наиболее качественного функционирования. В связи с этим, наблюдается постоянный рост требований к качеству и эффективности функционирования ИС.

Однако, на практике отмечено, что экономическая эффективность ИС при внедрении их в управление предприятиями обычно ниже, в отличие от иных инноваций в производство [1]. Академик В. А. Трапезников показал, что данное явление обусловлено самой природой информационных процессов и применение стандартных подходов к определению оценок эффективности в этом случае некорректно [2].

Проблематике разработки моделей описания и оценки эффективности сложных систем посвящены работы Э. Квейда, Д. Клиланда, И. М. Яглома, Дж. Касти, Дж. Кейслера, М. Месаровича и Я. Такахары, Н. П. Бусленко, Б. А. Резникова, Б. Я. Советова, Б. С. Флейшмана, А. И. Яблонского, С. А. Яковлева и др. Однако следует отметить, что данные подходы лишь частично относятся к решению задач оценки эффективности функционирования ИС, если рассматривать последние как технические системы и средства обработки информации и управления другими сложными системами.

Разработка частных оценок функционирования ИС, таких как надежность, устойчивость, живучесть, безопасность и т.п., рассмотрена в работах А. Авижениса и Ж.-К. Лапри, Д. Л. Белоцерковского, Л. С. Бернштейна, И. Н. Боженюка, А. Н. Борисова, В. М. Вишневого, Ю. Ю. Громова, А. Г. Додонова, М. Б. Игнатьева, В. Ф. Крапивина, В. В. Круглова, М. Г. Кузнецова, Д. В. Ландэ, В. В. Липаева, Р. Б. Мазепы, Ю. Е. Малашенко, А. Г. Мамиконова, Б. А. Мандзия, А. Н. Мелихова, Ю. Е. Мельникова, Ю. М. Парфенова, А. В. Поспелова, В. М. Розенберга, И. А. Рябинина, В. И. Сагунова, И. Ю. Стекольников, Б. С. Флейшмана и др. Следует отметить, что рассмотренные подходы также имеют недостатки: большинство подходов не учитывают структуру ИС в целом и протекающих в ней процессов, а так же особенностей ее элементов [3].

Модернизация информационных систем обуславливается усложнением их структуры, которая в большинстве случаев является комбинаторной, т.е. состоит из множества узлов и информационных потоков, связывающих их [4, 5]. Функционирование информационных систем осуществляется под влиянием негативных внешних воздействий, которые являются причиной изменения или уничтожения как узлов системы, так и информационных потоков, каждый из которых характеризуется соответствующим набором параметров. Таким образом, влияние негативных внешних воздействий, а также сам процесс рабочей эксплуатации информационной системы, оказываются виновниками возникно-

вения дефектов в функционировании элементов системы или выходе их из строя, а также сбоев и разрывов информационных потоков, что влечет изменение параметров функционирования информационной системы во времени.

Это обуславливает актуальность научной проблемы, которая заключается в разработке математического аппарата разработки и анализа информационных систем, находящихся под влиянием негативных внешних воздействий.

Для разрешения данной научной проблемы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать аналитические и процедурные модели оценки параметров функционирования информационных систем, находящихся под влиянием негативных внешних воздействий.

2. Разработать аналитические и процедурные модели определения параметров структуры и отдельных элементов информационных систем, максимизирующих эффективность их функционирования.

3. Разработать аналитические и процедурные модели распределения ресурсов в информационных системах с целью ее реинжиниринга.

Нечеткость и неопределенность при решении задач разработки и анализа информационных систем происходит из-за неполной или недостаточной информации о параметрах как самой системы, так и воздействиях внешней среды. Традиционным подходом в решении задач моделирования и принятия решений в условиях неопределенности является вероятностный подход, использование которого сопряжено с трудностями, определяющимися отсутствием экспериментальных данных, недостаточным объемом статистической информации, отсутствием жестких функциональных зависимостей. Нечеткость характеризуется количеством элементов системы, их территориальной распределенностью, количеством и многообразием связей между ними, сложностью системы, действием трудноформализуемых негативных внешних воздействий. В этом случае эффективнее применить математический аппарат теории нечетких множеств, который позволяет проводить анализ функционирования информационных систем, рассматривая их параметры и действия негативных внешних воздействий как нечеткие.

Список использованных источников

1. Кайгородцев, Г. И. Методика оценки эффективности информационных систем / Г. И. Кайгородцев, А. В. Кравченко // Прикладная информатика. – 2015. – Т. 10, № 1(55). – С. 5 – 14.

2. Трапезников, В. А. Автоматическое управление и экономика / В. А. Трапезников // Автоматика и телемеханика. – 1966. – № 1. – С. 5 – 22.

3. Громов, Ю. Ю. Задача оптимального распределения равноэффективных негативных внешних воздействий по элементам сетевой информационной

системы / Ю. Ю. Громов, Ю. В. Минин, В. В. Алексеев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 7. – С. 1 – 5.

4. Размещение узлов сетевой информационной системы с топологией «звезда-дерево» / Ю. В. Минин, Ю. Ю. Громов, Н. А. Аль-Матари, Б. М. Г. Саид // Информация и безопасность. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 260 – 265.

5. Размещение узлов сетевой информационной системы с топологией «дерево» / Ю. В. Минин, А. И. Елисеев, Б. М. Г. Саид, Е. Н. Минина // Информация и безопасность. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 131 – 134.

С. А. К. Диане, Е. А. Лесив

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

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОБУЧАЮЩИХ МНОЖЕСТВ В ЗАДАЧАХ НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Аннотация. Описана технология автоматического синтеза обучающих множеств для настройки нейросетевых анализаторов изображений в виртуальной среде с использованием средств трехмерной графики. Показана применимость предложенного подхода в задаче распознавания объектов на сложном фоне.

S. A. K. Diane, Ye. A. Lesiv

(Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

AUTOMATIC SYNTHESIS OF TRAINING DATASETS IN PROBLEMS OF NEURAL IMAGE ANALYSIS

Abstract. The technology of automatic synthesis of datasets is described for training neural network image analyzers in a virtual environment using three-dimensional graphics. The applicability of the proposed approach to the problem of object recognition on a complex background is shown.

Введение. В рамках научной проблематики визуального анализа изображений можно выделить несколько основных задач, решение каждой из которых допускает применение технологии нейронных сетей, обучаемых на базах аннотированных примеров:

- 1) визуальная классификация одиночных объектов [1];
- 2) локализация и оценка геометрических параметров объектов [2, 3];
- 3) визуальная навигация и оценка состояния внешней среды [4];

- 4) визуальная сегментация объектов на изображении [5];
- 5) оценка глубины изображения и 3D-реконструкция [6];
- 6) анализ топологии и лингвистическая интерпретация сцен [7].

Подход, объединяющий решение вышеперечисленных задач по настройке визуальных анализаторов, может базироваться на применении технологий виртуальной реальности [8, 9].

1. Автоматическое формирование обучающих выборок в виртуальной среде. В настоящем исследовании предлагается технология синтеза обучающих множеств, базирующаяся на применении средств трехмерной графики (библиотека OpenGL) и разработанного на их основе программно-алгоритмического комплекса (рис. 1).

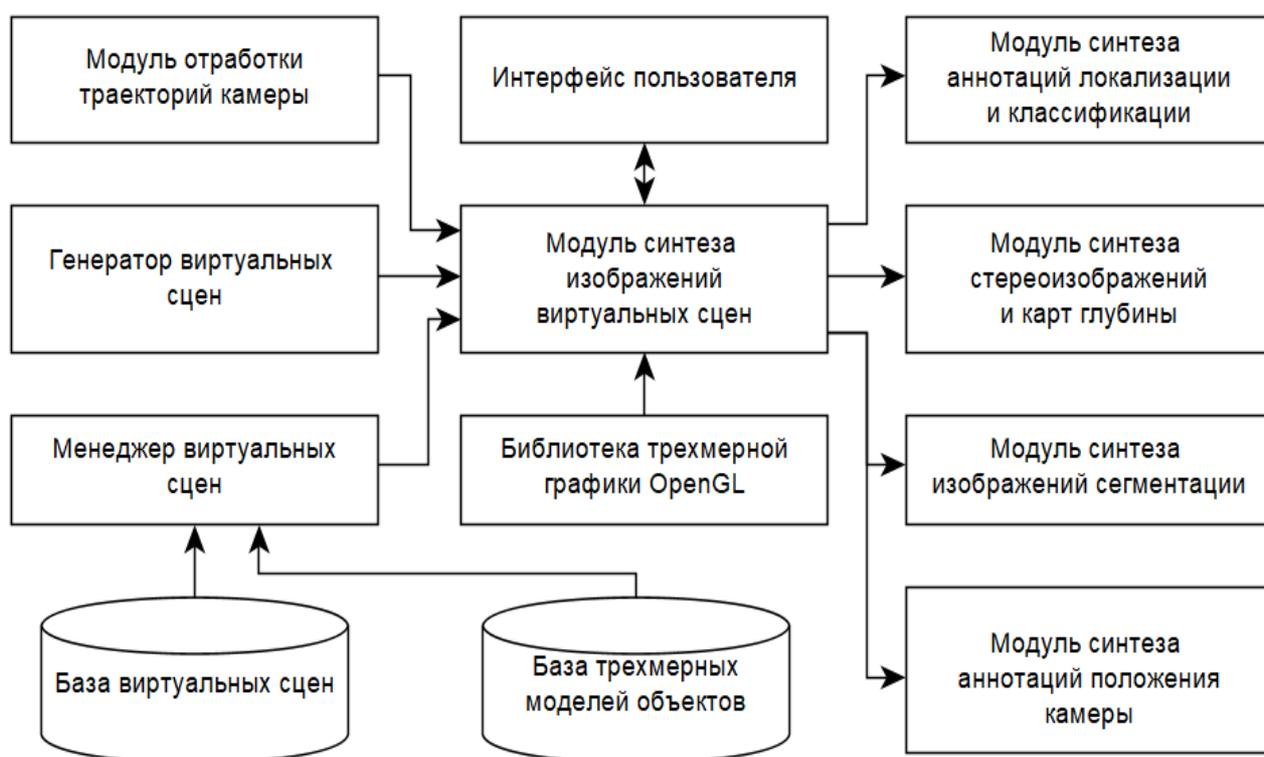


Рис. 1. Структура программного комплекса для генерации обучающих множеств

В основе программного комплекса для синтеза обучающих множеств (КСОМ) лежит модуль синтеза изображений виртуальных сцен. Виртуальная сцена представляет из себя совокупность трехмерных объектов различных категорий, снабженных описанием положения в пространстве, ориентации и цветовых характеристик.

В соответствии с вышеперечисленными задачами визуального анализа изображений КСОМ позволяет генерировать обучающие выборки для решения задач визуальной классификации, локализации, сегментации, оценки глубины изображений. Кроме того, виртуальная среда предоставляет доступ к точному положению камеры в последовательные моменты времени, что дает

возможность синтеза обучающих выборок и для решения задачи визуальной одометрии.

Формирование виртуальных сцен на этапе, предшествующем отрисовке, может выполняться двумя способами. Для задач грубой настройки нейросетевых классификаторов, когда взаимное положение различных объектов принципиально и, напротив, требуется как можно большее разнообразие перемещений объектов по сцене, применяется подход, суть которого в следующем. Задается или случайным образом выбирается число N объектов, одновременно наблюдаемых в сцене. Формируется множество случайных положений для данных объектов

$$P = \{p_1, \dots, p_N\}, \quad (1)$$

Производится устранение ситуаций взаимопроникновения объектов на основе метода потенциальных полей:

$$p_i' = p_i + \min(d_{\max}, \sum_{j=1, j \neq i}^N \eta / (p_j - p_i)^2),$$

где $p_i' = \{x', y', z'\}$ – обновленное положение объекта; d_{\max} – максимальное смещение объектов; η – коэффициент силы отталкивания.

Для задач настройки нейросетевых классификаторов на решение конкретных прикладных задач применяется подход, основанный на загрузке заблаговременно подготовленных виртуальных сцен. Разнообразие обучающих примеров при этом достигается уже не вариацией положения предметов в сцене, а изменением ракурса наблюдения в процессе движения камеры по указанной траектории.

На первом этапе решения конкретной прикладной задачи по настройке визуального классификатора используется программное обеспечение, позволяющее формировать описания виртуальных сцен в виде

$$W = \{o_1, \dots, o_N\}, \quad (2)$$

где o_i – программная структура, характеризующая положение, ориентацию, класс и особенности внешнего облика объекта. Обеспечивается совместимость форматов хранения описаний сцен с КСОМ для корректной загрузки виртуальной среды.

На втором этапе автоматически сформированные сцены загружаются в КСОМ: производится интерпретация текстовых описаний сцен и формирование соответствующих программных представлений для объектов, перечисленных в файле сцены. Далее производится определение достоверных результатов визуального анализа на основе прямого доступа к свойствам загруженных программных структур. Аннотации, содержащие желаемые результаты анализа ти-

па и положения объектов, сохраняются совместно с изображениями в каталог на диске для дальнейшей настройки нейронных сетей.

Отметим, что первый этап может выполняться как с применением готовых трехмерных моделей в качестве элементов множества W , так и с применением моделей, синтезируемых процедурно. Последний подход предпочтителен в силу неограниченных возможностей по вариации параметров и, как следствие, внешнего облика данных объектов.

2. Экспериментальная оценка применимости технологии. Важнейшим вопросом в оценке применимости развиваемой технологии является проверка способности сверточных нейронных сетей, обученных на синтетических примерах, осуществлять визуальный анализ изображений, полученных в реальной среде функционирования автономных роботов.

При поиске ответа на данный вопрос в качестве примера была рассмотрена задача поиска человека в лесу. По результатам обучения нейронной сети YOLO v2 [1] на грубо проработанных виртуальных сценах с лесными массивами удалось настроить нейросетевой классификатор на распознавание человека в реальных условиях леса (рис. 2).

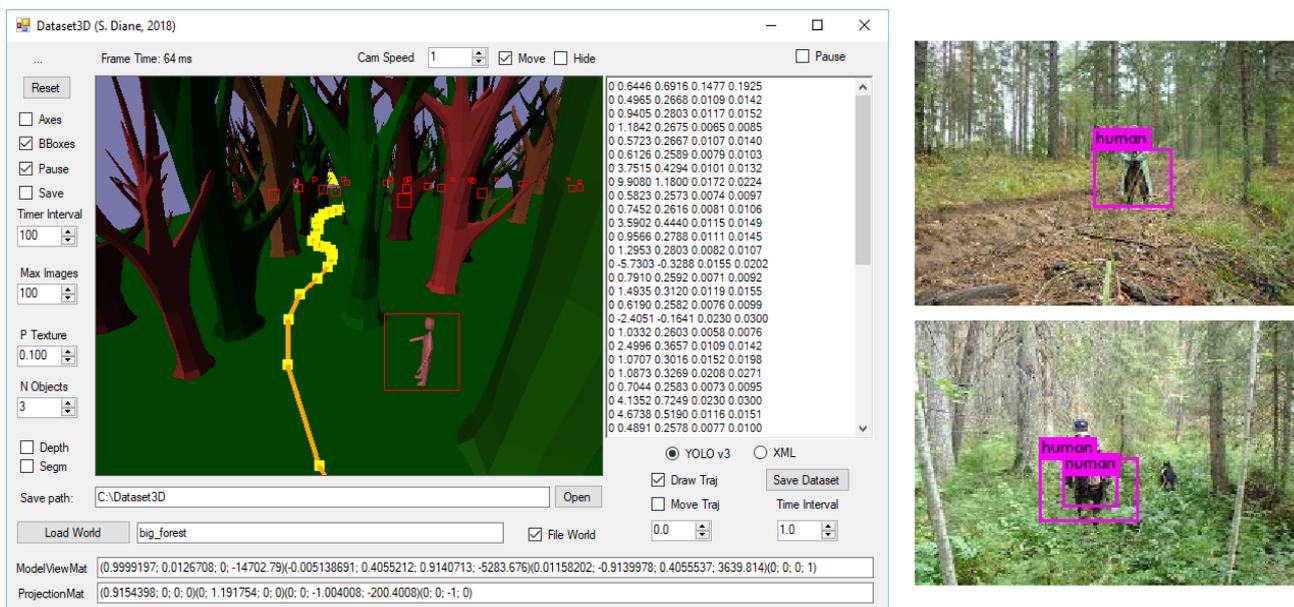


Рис. 2. Результаты моделирования виртуальных сцен (слева) и распознавания схожих объектов в реальной среде (справа)

Заключение. Полученные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода. Интеграция технологий трехмерной графики и экспертных знаний о предметной области позволяет осуществить эффективную и вычислительно быструю генерацию обучающих множеств для решения задач визуального анализа в необходимом объеме.

Следует понимать, что обучение на виртуальных множествах не дает сто-процентной точности в настройке нейронных сетей под конкретную задачу. Тем не менее, дальнейшее повышение качества функционирования нейросетевых анализаторов изображений возможно путем дообучения сети на значительно меньшем множестве реальных изображений из выбранной предметной области.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 30 «Теория и технологии многоуровневого децентрализованного группового управления в условиях конфликта и кооперации».

Список использованных источников

1. J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object De-tection", in CVPR. – 2016.
2. S. Diane, E. Lesiv, I. Pesheva, A. Neschetnaya, Multi-Aspect Environment Mapping with a Group of Mobile Robots. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). – P. 474 – 478.
5. Joseph Redmon, Anelia Angelova, Real-Time Grasp Detection Using Convolutional Neural Networks, 2014, arXiv:1412.3128.
6. Loquercio, Antonio & Maqueda, Ana & R. Del Blanco, Carlos & Scaramuzza, Davide. (2018). DroNet: Learning to Fly by Driving. IEEE Robotics and Automation Letters. PP. 1-1. 10.1109/LRA.2018.2795643.
7. Shu Liu, Lu Qi, Haifang Qin, Jianping Shi, Jiaya Jia, Path Aggregation Network for Instance Segmentation. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018.
8. D. Eigen, C. Puhrsch, R. Fergus, Depth Map Prediction from a Single Image using a Multi-Scale Deep Network, arXiv:1406.2283, 2014.
9. R. Socher, Cliff C.-Y. Lin, A. Ng, and C. Manning. Parsing Natural Scenes and Natural Language with Re-cursive Neural Networks. In Proc. of the 26th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2011.
10. A. Toshev, A. Makadia, K. Daniilidis, Shape-based Object Recognition in Videos Using 3D Synthetic Object Models. In 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
11. K. Židek, P. Lazorík, J. Pite, A. Hošovský, An Automated Training of Deep Learning Networks by 3D Virtual Models for Object Recognition. Symmetry. – 2019. – 11(4). – 496.

Научное электронное издание

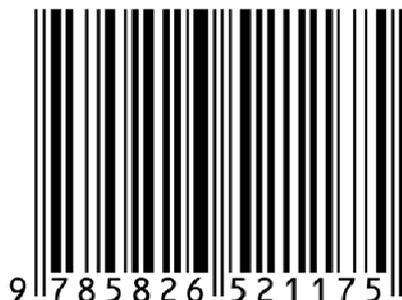
УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

**Материалы XVI Всероссийской
школы-конференции молодых ученых**

г. Тамбов 10 – 13 сентября 2019 г.

Редакторы : И. В. Калистратова, Л. В. Комбарова,
Е. С. Мордасова
Компьютерное макетирование : Т. Ю. Зотовой, М. Н. Рыжковой,
И. В. Евсеевой

ISBN 978-5-8265-2117-5



Подписано к использованию 18.10.2019.

Тираж 100 шт. Заказ № 115

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.

Телефон (4752) 63-81-08

E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru