

Российская академия наук  
Национальный комитет по автоматическому управлению  
Научный совет по теории управляемых процессов и автоматизации РАН  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН  
Уфимский государственный авиационный технический университет  
Арзамасский НОЦ ПУ (на базе АПИ)  
Волгоградский НОЦ ПУ (на базе ВолГУ)  
Воронежский НОЦ ПУ (на базе ВГАСУ)  
Инновационный НОЦ ПУ (на базе МАИ)  
Инновационный НОЦ ПУ (на базе МВТУ)  
Казанский НОЦ ПУ (на базе КГТУ)  
Красноярский НОЦ ПУ (на базе СФУ)  
Курский НОЦ ПУ (на базе ЮЗГУ)  
Липецкий НОЦ ПУ (на базе ЛГТУ)  
Магнитогорский НОЦ ПУ (на базе МГТУ)  
НОЦ «Системный анализ в управлении» (на базе МИФИ)  
Пермский НОЦ ПУ (на базе ПГТУ)  
Самарский НОЦ ПУ (на базе СГАУ)  
Старооскольский НОЦ ПУ (на базе СТИ)  
Тверской НОЦ ПУ (на базе ТГТУ)  
Удмуртский НОЦ ПУ (на базе УдГУ)  
Уфимский НОЦ ПУ (на базе УГАТУ)

## УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

*X Всероссийская школа-конференция молодых ученых*

5–7 июня 2013 года

*Материалы конференции*

ТОМ 3

Уфа 2013

Управление большими системами: материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Том 3/ Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2013. – 339 с.

Представлены материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами», проходившей 5-7 июня 2013 г. в г. Уфа.

В сборник включены научные статьи молодых ученых по управлению техническими системами, технологическими процессами и промышленными установками.

*Материалы публикуются в авторской редакции.*

**ISBN 978-5-4221-0450-5**

©Уфимский государственный  
авиационный технический университет, 2013

## **X ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ»**

организована Институтом проблем управления РАН, сетью Научно-образовательных центров проблем управления (НОЦ ПУ) и Уфимским государственным авиационным техническим университетом, совместно с рядом ведущих научно-исследовательских институтов и вузов России, с целью развития и пропаганды достижений теории и практики управления большими системами.

### ***Основные направления конференции:***

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

### **ОБЩЕЕ РУКОВОДСТВО**

Васильев С.Н., академик РАН (Москва, директор ИПУ РАН),  
Гузаиров М.Б., д.т.н., проф. (Уфа, ректор УГАТУ).

### **ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ**

Новиков Д.А., чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. (Москва, ИПУ РАН) – сопредседатель,  
Бадамшин Р.А., д.т.н., проф. (Уфа, проректор УГАТУ по НиИД) – сопредседатель,  
Н. Woern, проф. (Германия, Технический университет г. Карлсруэ),  
Баркалов С.А., д.т.н., проф. (Воронеж, ВГАСУ)  
Бурков В.Н., д.т.н., проф. (Москва, ИПУ РАН),  
Валеев С.С., д.т.н., проф. (Уфа, УГАТУ),  
Васильев В.И., д.т.н., проф. (Уфа, УГАТУ),  
Воронин А.А., д.ф.-м.н., проф. (Волгоград, ВолГУ),  
Гвоздев В.Е., д.т.н., проф. (Уфа, УГАТУ),  
Головинский П.А., д.ф.-м.н., проф. (Воронеж, ВГАСУ),  
Засканов В.Г., д.т.н., проф. (Самара, СГАУ),  
Емельянов С.Г., д.т.н., проф. (Курск, ЮЗГУ),  
Еременко Ю.И., д.т.н., проф. (Старый Оскол, СТИ),  
Ильясов Б.Г., д.т.н., проф. (Уфа, УГАТУ)  
Кузнецов В.Н., д.т.н., проф. (Тверь, ТГТУ),  
Мезин И.Ю., д.т.н., проф. (Магнитогорск, МГТУ),  
Непейвода Н.Н., д. ф.-м.н., проф. (Ижевск, УдГУ),  
Омельченко И.Н., д.т.н., проф. (Москва, МВТУ),  
Пакшин П.В., д.т.н., проф. (Арзамас, АПИ),  
Погодаев А.К., д.т.н., проф. (Липецк, ЛГТУ)  
Сиразетдинов Р.Т., д.т.н., проф. (Казань, КГТУ),  
Столбов В.Ю., д.т.н., проф. (Пермь, ПГТУ),  
Подлесный С.А., д.т.н., проф. (Красноярск, СФУ),  
Юсупова Н.И., д.т.н., проф. (Уфа, УГАТУ)

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

### *Председатель оргкомитета*

Р.А. Мунасыпов – д-р техн. наук, проф. кафедры ТК УГАТУ

### *Заместитель председателя*

А.Г. Карамзина – канд. техн. наук, доц. кафедры ТК УГАТУ

### *Члены оргкомитета*

К.А. Ахмеров

Л.Н. Мухамедрахимова

Ю.Р. Фазлетдинова

О.В. Целищев

### *Ученый секретарь оргкомитета*

Е.Ш. Закиева – канд. техн. наук, доц. кафедры ТК УГАТУ

Адрес: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет,  
Кафедра технической кибернетики (корпус б)

Телефон: (347) 273-65-42

Факс: (347) 273-78-35

E-mail: [ubs2013@bk.ru](mailto:ubs2013@bk.ru)

Место и время проведения  
5-7 июня 2013 г., г. Уфа, пансионат «Родник Здоровья»

## СОДЕРЖАНИЕ

### Направление 4. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОМЫШЛЕННЫМИ УСТАНОВКАМИ

<i>Абдулнагимов А.И., Куликов Г.Г., Арьков В.Ю.</i> Обобщенные иерархические модели функционирования сложных систем управления.....	11
<i>Александров А.Г., Шатов Д.В.</i> Настройщик для системы автоматического регулирования.....	15
<i>Алексеев А.Ю., Широкий А.А.</i> Математическое моделирование управления молекулярно-генетическими процессами развития остеоартроза.....	18
<i>Арутюнов А.Л.</i> Модель экономической оценки энергоэффективности от использования ГТУ в производстве.....	22
<i>Ахметшин А.И., Даринцев О.В.</i> Синтез алгоритмов адаптивного управления для объекта с запаздыванием по состоянию и управлению в основе модельного наполнения тренажерного комплекса.....	26
<i>Бирюкова П.А.</i> Оценка эффективности модифицированной схемы использования плазменно-химического реактора на нефтеперерабатывающем заводе.....	30
<i>Бордуков Д.А., Мандель А.С.</i> Модернизация современных методов прогнозирования состояния железнодорожных путей и полосы отвода при учете ограничений с помощью алгоритмов структурного прогнозирования.....	37
<i>Бразгин Е.В.</i> Разработка и исследование модели для оценки потребностей НПЗ в электроэнергии.....	41
<i>Васильева Т.Н.</i> Особенности управления финансовым ущербом от отказов компонентов сложных технических систем.....	45
<i>Галкин А.В.</i> Интервальная модель рабочего процесса инерционного трансформатора вращающего момента.....	49
<i>Галлямов Ш.Р., Месропян А.В., Митягина М.О.</i> Вопросы управления техническими комплексами для испытания пластов в необсаженных скважинах.....	53
<i>Гилимьянов Р.Ф., Zhuang H.</i> Управление мощностью нисходящего канала в OFDMA беспроводных сотовых сетях.....	57

<b>Греков А.В., Коржев В.С., Грекова О.В.</b>	
Повышение отказоустойчивости аппаратуры систем управления на основе скользящего резервирования с восстановлением.....	61
<b>Даринцев О.В., Мигранов А.Б.</b>	
Планирование траекторий движения мобильных роботов на основе приближенных, интеллектуальных методов.....	65
<b>Дильмухаметов В.М.</b>	
Алгоритмы оптимального автоматического управления дебитом нефтескважины на базе УЭЦН.....	69
<b>Дмитриев В.М., Ганджа Т.В.</b>	
Компьютерное моделирование SCADA-систем.....	75
<b>Еремеев И.М., Кавалеров М.В., Южаков А.А.</b>	
Организация системы управления гусеничного робота низкой себестоимости.....	79
<b>Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И.</b>	
К вопросу совершенствования набора эвристических правил при реализации нейросетевого оптимизатора параметров ПИД – регулятора.....	83
<b>Еременко Ю.И., Халапян С.Ю., Ярмуратий Д.Ю.</b>	
Разработка нейроэкспертного тренажера оператора шахтной печи.....	87
<b>Жбанова Н.Ю.</b>	
Построение и настройка переключаемой нейронечеткой системы для моделирования процесса варки сахара.....	91
<b>Жернаков С.В., Гильманишин А.Т.</b>	
Управление гибридными интеллектуальными алгоритмами контроля и диагностики авиационного ГТД в условиях бортовой реализации.....	95
<b>Злотов А.В., Коваленко А.Г.</b>	
Динамические задачи планирования производства, хранения, транспорта и распределения нефти и нефтепродуктов.....	99
<b>Ибрагимова Э.К., Ильясов Б.Г., Саитова Г.А.</b>	
Анализ устойчивости многосвязных САУ с запаздыванием в перекрестных связях.....	102
<b>Искужин Р.В.</b>	
Анализ и синтез алгоритмов управления нефтескважины на базе электрического центробежного насоса.....	106
<b>Каравашкина Е.О.</b>	
Некоторые способы резервирования вычислителей комплексной системы управления беспилотного летательного аппарата.....	111
<b>Каяшев А.И., Богданов А.В.</b>	
Двухмерный четкий логический регулятор давления и температуры пара парового котла.....	115
<b>Кетов А.С.</b>	
Разработка автоматизированной системы управления процессом переработки жидких радиоактивных отходов на основе искусственного интеллекта.....	119

<b>Корепанов В.О.</b> Алгоритм двойного наилучшего ответа в игре формирования сети.....	125
<b>Коровин Я. С., Хисамутдинов М. В.</b> Оперативное прогнозирование наступления отказов в работе нефтепромыслового оборудования.....	129
<b>Коровин Я. С., Хисамутдинов М. В.</b> Система поддержки принятия решений операторов водо-водяного энергетического реактора на основе методов интеллектуального анализа данных.....	133
<b>Корчунов А.Г., Лысенин А.В.</b> Методика оценки сквозной технологии производства метизной продукции.....	137
<b>Коурова Н.Г.</b> Динамическая модель процесса резания в системе автоматического управления температурой в зоне резания металла.....	141
<b>Кузина Н.Е., Галкин А.В.</b> Решение задачи теплопроводности методом конечных элементов с использованием численных алгоритмов работы с разреженными матрицами.....	145
<b>Кузьмин М.И.</b> Систематизация методов моделирования изображений для распознавания поверхностных дефектов листового проката.....	149
<b>Куликов Г.Г. , Фатиков В.С., Трушин В.А. , Ганеев А.А., Абдулнагимов А.И.</b> Концепция бортовой системы мониторинга состояния авиационного ГТД на основе идентификации по измеряемым параметрам модели высоконагруженной лопатки турбины.....	153
<b>Кутейникова М.М.</b> Вычисление координат смещения торцов лопаток в системе измерения радиальных зазоров.....	157
<b>Лепешкин С.Н.</b> Эффективность параллельной работы двигателей без жесткой связи с общей нагрузкой.....	162
<b>Лесовой Д.А.</b> Обоснование порога идентификации поверхностных дефектов листового проката цветных металлов.....	166
<b>Мартынов В.В., Пугин М.А., Яруллин Ч.А., Пугин А.М.</b> Система управления «холодным запуском» двигателя снегоболотохода в особо тяжелых автономных условиях.....	169
<b>Масина О.Н., Игонина Е.В., Щербаков А.В.</b> Исследование устойчивости системы управления перевернутым маятником с помощью построения логического регулятора.....	175

<b>Мезенцев И.С.</b> Применение нечеткой логики в управлении дорожными светофорными объектами.....	179
<b>Морозов Ю.В.</b> Синтез квази-оптимального по быстродействию закона управления колесным роботом при наличии выпуклых фазовых ограничений.....	183
<b>Морозов А.М., Понуровский И.С.</b> «Грин»—система логического управления с использованием микропрограммно-аппаратного вычисления логических функций на пЛИС <i>FPGA</i> .....	187
<b>Морозова М.В.</b> Оптимальное управление переориентацией космического аппарата при перенацеливании аппаратуры зондирования.....	190
<b>Мошников А.С.</b> Средства активной безопасности автомобилей.....	194
<b>Мунасыпов Р.А., Шахмаметьев Т.Р., Ахметзянов И.С., Хамадеев И.Х.</b> Особенности построения движений реконфигурируемого мобильного робота.....	199
<b>Муратов Ш.Х., Деваев В.М.</b> Задача точной доставки грузов управляемым парашютом в условиях неопределенности ветрового воздействия.....	203
<b>Неведров А.С.</b> О возможности применения имитационного моделирования для оперативного прогнозирования производственных процессов обогащения руд.....	209
<b>Новоженин М.Б., Лютов А.Г.</b> Определение остаточного ресурса нефтехимического оборудования с использованием нейронных сетей.....	213
<b>Ноздрин Д.А.</b> Интеллектуальное управление инженерными сетями (на примере электросетей).....	217
<b>Родионова Л.Н., Кантор О.Г., Гарифуллин И.Н.</b> Управление ресурсными потоками в системе материально-технического снабжения нефтегазодобывающих предприятий.....	222
<b>Павлюченко Д.В., Динь Туан Лонг</b> Самонастройка функций и связей в отказоустойчивой многопроцессорной системе.....	228
<b>Парфенов Е.В., Горбатков С.А., Невьянцева Р.Р.</b> Управление технологическими процессами электролитно-плазменной обработки на основе спектральных методов диагностики состояния объекта.....	233

<b>Пахомов К.В.</b>	
Исследование управляемого движения колёсного мобильного робота на основе кинематической и динамической модели.....	237
<b>Перегудова О.А., Пахомов К.В.</b>	
Об управлении движением колесной платформы с неточно известной массой и с учетом запаздывания в цепи обратной связи.....	241
<b>Петухов И.В.</b>	
Интеллектуальная информационная поддержка принятия решений при оценке профпригодности операторов эргатических систем.....	245
<b>Понуровский И.С.</b>	
Корпоративные системы управления мобильными устройствами, работающими под управлением операционной системы iOS.....	249
<b>Посягин А.И., Южаков А.А.</b>	
Нейронная сеть в структуре аналого-цифрового преобразователя.....	253
<b>Проказина М.В., Шайдуллин Р.А.</b>	
Имитационная модель календарного планирования товарно-сырьевого парка НПЗ.....	257
<b>Саитова Г.А.</b>	
Робастная устойчивость многосвязных систем автоматического управления.....	261
<b>Сергеев Р.Ф., Готлиб Б.М.</b>	
Интеллектуализация систем автоматизированного проектирования штампов: современное состояние и тенденции развития.....	265
<b>Суханцев С.С.</b>	
Выбор оптимального плана в процессе перепланирования производства.....	269
<b>Сысоев А.С.</b>	
Синтез мультистартового параллельного алгоритма безусловной многомерной оптимизации для минимизации функции транспортной задержки.....	273
<b>Танрывердиев И.О.</b>	
Интеллектуальная система лесной таксации.....	277
<b>Тимофеев А.О., Парфенов Е.В., Ерохин А.Л., Невьянцева Р.Р.</b>	
Анализ низкочастотной области импедансных спектров процесса плазменно-электролитического оксидирования.....	282
<b>Трофимов Д.А., Мунасыпов Р.А.</b>	
Моделирование проведения нервного импульса в динамической нейронной сети.....	286
<b>Тюрин С.Ф., Грекова О.В., Греков А.В.</b>	
Применение комбинированной модели отказов для поиска функционально-полных толерантных булевых функций четырех аргументов.....	289

<b>Тюрин С.Ф., Каменских А.Н.</b>	
Аппаратура управления на основе самосинхронных функционально-полных толерантных элементов.....	294
<b>Фу Ф.Г.</b>	
К вопросу об имитации работы грузовой железнодорожной станции.....	298
<b>Хасанов З.М., Гузаиров Р.М.</b>	
Синтез систем управления для многосвязных электроприводов технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий.....	302
<b>Хасанов З.М., Гузаиров Р.М., Ахметзянова И.Р.</b>	
Алгоритм выбора оптимальных конструктивных параметров многосвязанных электроприводов.....	306
<b>Хужахметов И.И.</b>	
Методика формирования траектории движения мобильного робота на базе нечеткой логики.....	310
<b>Целищев О.В., Мунасыпов Р.А.</b>	
Структура интеллектуальной системы управления строительным роботизированным комплексом.....	314
<b>Цуканов М.А.</b>	
Координация работы технологических звеньев сложноструктурированного производства как экономическая мера.....	318
<b>Шарьбин С.И., Столбов В.Ю.</b>	
Автоматизация процессов анализа и классификации сложных мезоструктур металлов и сплавов.....	322
<b>Юдинцев Б.С.</b>	
Интеллектуальная система построения неконфликтных траекторий для коллектива мобильных роботов.....	326
<b>Юсупов Т.Э.</b>	
Создание интеллектуальных скважин и месторождений.....	330
<b>Яковлева О.С.</b>	
Перспективы применения нейротехнологий в системах контроля и диагностики технического состояния продуктопроводов.....	336

## **ОБОБЩЕННЫЕ ИЕРАРХИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

### **Аннотация**

Разработана иерархическая модель процессов развития отказов для анализа системной безопасности сложных систем управления на примере системы автоматического управления, контроля и диагностики газотурбинных двигателей. Предложена методика оценки параметров состояний на основе нечеткой логики для контроля и диагностики процессов развития отказов.

### **Введение**

В настоящее время большое внимание уделяется обеспечению системной безопасности сложных систем управления и их эксплуатации по техническому состоянию. Современные цифровые системы автоматического управления, контроля и диагностики (САУКиД) характеризуются большим числом функций регулирования, контроля и диагностики, в то время как наиболее критичными в сложных системах являются их элементы и блоки (датчики, исполнительные механизмы и т.д.).

Существующие в настоящее время технологии обнаружения отказов основаны преимущественно на «четких» логических операциях и выявляют лишь два состояния – «исправное состояние» либо «отказ», и не учитывают процессы деградации элементов и блоков.

### **Постановка задачи**

Необходимо разработать обобщенные иерархические модели функционирования сложных систем управления для повышения эффективности контроля и диагностики их технического состояния.

В рамках модели требуется установить соответствие между отказами и их комбинациями и текущим состоянием системы управления, а также какие отказы приводят к деградации системы или полному ее отключению. Модель должна позволять количественно оценивать состояние системы управления на каждом уровне иерархии.

### **Иерархические модели процессов развития отказов**

Комплексную диагностику сложных систем предлагается проводить по элементам и блокам, используя метод анализа иерархий. Для этого проводится декомпозиция системы на независимые подсистемы различного уровня иерархии по структурным и функциональным признакам. Например, силовая установка летательного аппарата может быть декомпозирована на САУКиД (FADEC), гидромеханическую исполнительную часть САУКиД, топливная система, системы запуска, масляная система, дренажная система и др.

Предполагается, что в каждом элементе системы заложена встроенная функция контроля.

На основе иерархической декомпозиции в соответствии с конструкцией и в соответствии с логикой взаимного влияния отказов строится иерархическая модель процессов развития, включающая функциональную структуру (блок-схему); физическую структуру; дерево состояний (структуру состояния) элементов и блоков; дерево коэффициентов влияния отказов. Состояние элемента или системы представляется в виде вектора с параметрами {исправно, деградация, отказ}. Исправному состоянию соответствует «0», отказу – «1». Степень деградации принимает значения между «0» и «1».

Отказные состояния классифицируются в зависимости от степени деградации на «незначительное», «сложное», «опасно сложное», «катастрофическое» [1,2]. По степени деградации также оценивается расстояние до критической ситуации и скорость приближения к ней. Такая шкала позволяет определить предельное состояние, при котором дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна по причинам безопасности.

### **Методики определения параметров состояния**

Для повышения эффективности контроля технического состояния системы управления разработана методика определения параметров состояния с привлечением нечетких методов анализа информации об отказах элементов системы. Дискретные сигналы об отказах элементов предлагается представить в виде нечетких лингвистических переменных [3,4]. Затем определяются функции принадлежности для состояний «Исправно» и «Отказ». Оценка степени деградации определяется по функции принадлежности  $S$ , которая принимает значения в диапазоне:  $S \in [0,1]$ .

Степень деградации в первом приближении может быть описана функцией принадлежности, например, трапецеидального вида. База правил представляется таблицей, которая заполняется нечеткими правилами следующим образом. При наступлении нескольких отказов формируется сигнал об отказе «высшего» в иерархии элемента. В процессе фаззификации предлагается использовать дискретно-упорядоченную шкалу определения параметров состояний (рис.1), например, для датчиков с несколькими выходными обмотками. В этом случае, ранжирование состояний будет более объективным по сравнению с экспертными оценками.

Оценка коэффициентов влияния отказов проводится на основе модифицированного метода анализа иерархий, где  $n$  возможным отказам  $F_1, F_2, \dots, F_n$  сопоставляется множество числовых весов  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ , которые соответствовали бы фиксированным суждениям о значимости отказов системы.

На каждом уровне иерархии  $h_i$  для  $n$  элементов системы управления определяется вектор состояний  $S_{h_i}(x_n)$  {исправно, деградация, отказ} с учетом коэффициентов влияния отказов:

$$S_{h_i}(x_n) = \mu_T(x_n) \cdot \omega_n,$$

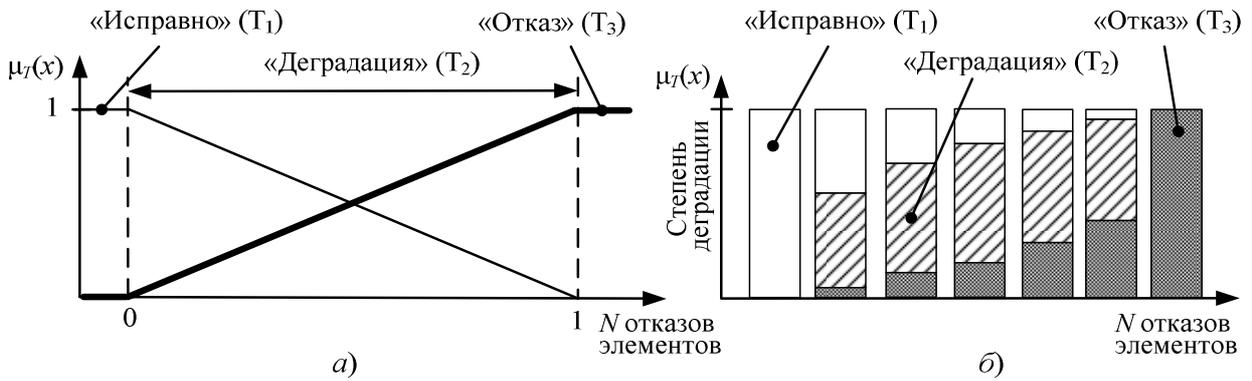


Рис. 1. Непрерывная (а) и дискретная (б) шкалы степени деградации

где  $\mu_T(x_n)$  – значение функции принадлежности элемента  $x_n$  (степень деградации). Для определения состояния элемента иерархии системы на более высоком уровне  $S_{h_i}(x_n)$  для входных состояний нижнего уровня  $S_{h_{i-1}}(x_n)$  выполняется дефаззификация.

Пример анализа состояний САУКиД газотурбинного двигателя (ГТД) с отказами представлен на рис. 2. Динамическая модель состояний определяется с учетом текущего состояния ГТД и коэффициентов влияния отказов, вызвавших это состояние. Коэффициенты влияния отказов данного элемента на состояние подсистем верхнего уровня могут быть определены по статистическим данным или экспертным оценкам. В данном примере САУКиД в целом считается исправной, при этом наблюдается частичная деградация (0,25), не влияющая на работоспособность системы.

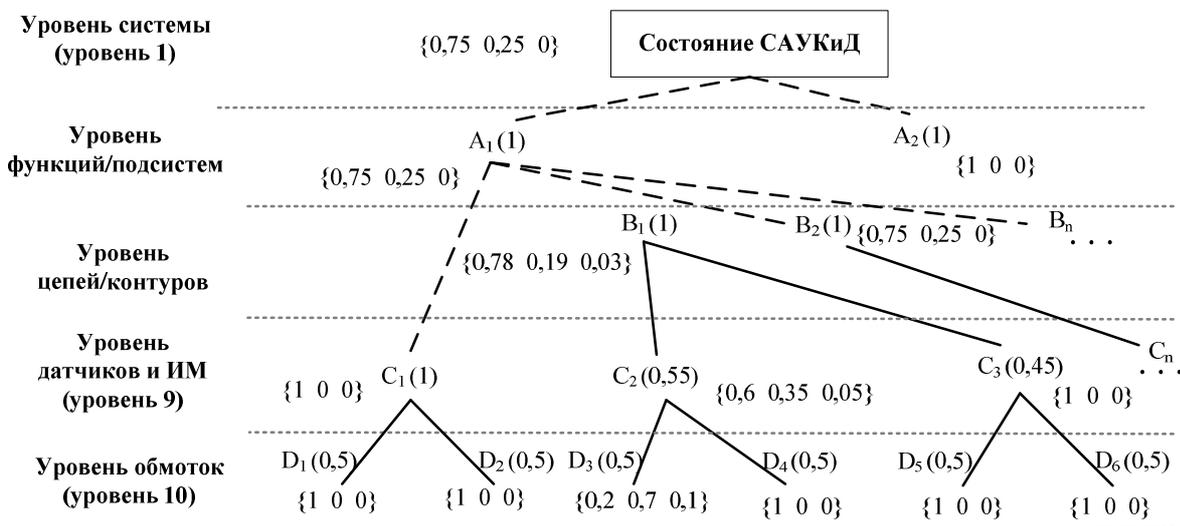


Рис. 2. Пример анализа иерархической структуры САУКиД ГТД с отказами

Такая система взаимовлияния отказов позволяет анализировать состояние всей силовой установки, как снизу вверх, так и сверху вниз и проводить более глубокий анализ по различным уровням декомпозиции системы управления за счет использования промежуточного состояния – деградации.

Применение иерархических нечетких баз знаний позволяет агрегировать («сворачивать») состояния системы в один вектор состояний. Кроме того, анализируются ситуации, когда ошибка была пропущена или ложно выявлена, что сказывается на оценке состояния САУКиД. Для этого предлагается оценивать и анализировать вероятности ошибок первого и второго рода по фактическим данным об эксплуатации системы.

### **Заключение**

Разработана обобщенная иерархическая модель процессов развития отказов, позволяющая количественно оценивать состояние деградации и постепенных отказов. Анализ иерархий позволяет перейти к модели состояний на основе процессов развития отказов, позволяющей оценивать состояние системы на каждом уровне иерархии. Предложен показатель «степень деградации», позволяющий получить объективную количественную оценку текущего состояния в виде обобщенного расстояния до критической ситуации и затем оценить резерв времени на принятие решений [5, 6].

Анализируя постепенное изменение характеристик или конструктивных параметров сложной системы, можно во многих случаях предотвратить возникновение аварийных ситуаций и тем самым обеспечить системную безопасность и надежность в процессе эксплуатации, чтобы гарантировать адекватные реакции во всем спектре негативных воздействий.

### **Список литературы**

1. Руководство Р-4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования самолетов гражданской авиации / Авиационный регистр. Межгосударственный Авиационный Комитет. – М.: Авиаиздат, 2010. – 265 с.
2. SAE ARP 4761 Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems And Equipment // Aerospace recommended practice. 1996. – 331 p. (<http://standards.sae.org/arp4761>)
3. Нечеткие марковские модели систем автоматического управления и контроля/ Г.Г. Куликов, В.Ю. Арьков, А.И. Абдулнагимов // Интеллектуальные системы управления. Коллективная монография под редакцией акад. РАН Васильева С.Н. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 154-163.
4. Kulikov G.G., Arkov V.Yu., Abdunagimov A.I. Hierarhical Fuzzy Markov Modelling for System Safety of Power-plant // Proc. of 4th International Symposium on Jet Propulsion and Power Engineering (ISJPPE 2012), September 10-12th 2012, Northwestern Polytechnical University Press, Xi'an, China. – P. 589-594.
5. ГОСТ 20417-75. Техническая диагностика. Общие положения о порядке разработки систем диагностирования.– М.: Стандарты. 1980. – 16с.
6. Кофман М., Пармонов П., Сабом Ю. Надежность и безопасность летательных аппаратов // Аэрокосмический курьер, №3-4, 2009. – С. 32-37.

## **НАСТРОЙЩИК ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

### **Аннотация**

Для больших систем управления, содержащих в своем составе большое количество контуров управления с ПИД-регуляторами, предлагается ввести новый элемент, называемый настройщик. Настройщик производит идентификацию параметров объекта управления и производит соответствующее изменение параметров регулятора.

### **Введение**

Многие технологические объекты в энергетике, химической промышленности и т. п. представляют собой большие системы управления. Так в [1] представлена система управления ТЭЦ. В статье показано, что такая система содержит 20 подсистем управления, связанных с отдельными технологическими установками в системе производства электрической энергии. Каждая такая подсистема содержит от 2 до 11 замкнутых контуров регулирования, содержащих регуляторы для управления технологическими параметрами. Система информационного обеспечения АЭС приведена в [2]. В системе присутствует 127 измеряемых величин: 53 датчика расхода, 20 датчиков давления, 37 датчиков температуры, 16 датчиков уровня, 1 датчик электрической мощности. Многие из них используются в процессе регулирования и помещены в контуры регулирования. Система управления турбогенераторной установкой отечественной Улан-Удэнской ТЭЦ описана в [3]. Система содержит около 12 контуров замкнутого регулирования, в каждом из которых стоит ПИ- или ПИД-регулятор, системы управления турбогенераторами в АЭС также представляют собой многоконтурные системы управления.

Каждый регулятор в такой системе требует обслуживания и частой подстройки, так как параметры объекта управления меняются. Обычно эти функции выполняет человек-оператор, что увеличивает затраты и повышает риск человеческой ошибки. В данной работе для обслуживания регуляторов предлагается использовать автоматический настройщик, который будет выполнять функции оператора.

Многие производители контроллеров предлагают потребителям готовые регуляторы систем управления, но они не могут полностью заменить оператора. Предлагаемый настройщик позволяет производить пересчет параметров регуляторов без участия человека-оператора.

## Система автоматического регулирования с настройщиком

Рассмотрим систему автоматического регулирования [4]. Уравнение объекта имеет вид:

$$T^{[i]}\dot{y}(t) + y(t) = k_p^{[i]}u(t - \tau^{[i]}) + f(t - \tau), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

$$t^{[i]} \leq t < t^{[i+1]},$$

где  $y(t)$  — измеряемый выход объекта,  $u(t)$  — управляющее воздействие,  $f(t)$  — неизвестное, ограниченное внешнее возмущение, действующее на объект,  $i$  — номер режима работы объекта.  $k_p^{[i]}, T^{[i]}, \tau^{[i]}$  — параметры объекта управления: коэффициент усиления, постоянная времени и запаздывание соответственно, которые изменяются в момент времени  $t^{[i]}$  и сохраняют свое значение на интервале времени  $t^{[i]} \leq t < t^{[i+1]}$ , которые достаточно велики.

ПИД-регулятор описывается уравнением:

$$g^{[i]}\dot{u}(t) + u(t) = k_c^{[i]}\varepsilon(t) + k_i^{[i]}\int_0^t \varepsilon(t) d\tilde{t} + k_d^{[i]}\frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = y^*(t) - y(t);$$

где  $g^{[i]}, k_c^{[i]}, k_i^{[i]}, k_d^{[i]}$  — коэффициенты ПИД-регулятора,  $y^*(t)$  — задающее воздействие (уставка),  $\varepsilon(t)$  — ошибка слежения. Параметры регулятора рассчитываются исходя из модели объекта и также остаются постоянными для каждого режима работы объекта.

При изменении параметров объекта требуется соответствующее изменение коэффициентов регулятора, для сохранения системой устойчивости и поддержания требуемого качества регулирования.

В [4][5] предлагается использовать для адаптации данной системы к меняющимся во времени параметрам объекта адаптивный регулятор, построенный с использованием алгоритмов конечно-частотной идентификации и позволяющий найти параметры объекта управления в условиях действия внешнего возмущения. В настоящей работе предлагается использовать настройщик, новая схема системы автоматического управления изображена на Рис. 1

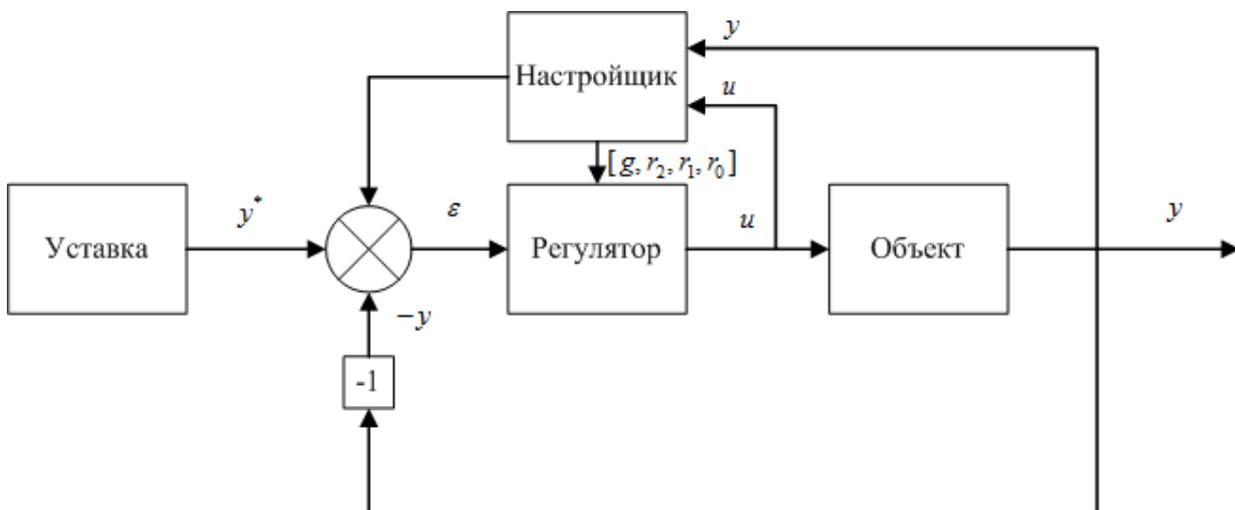


Рис. 1. Схема системы автоматического управления с настройщиком

Настройщик служит для идентификации коэффициентов модели объекта и изменения коэффициентов ПИД-регулятора. Настройщик работает параллельно с работой замкнутого контура. При изменении параметров объекта настройщик идентифицирует объект и осуществляет расчет коэффициентов регулятора по тому же алгоритму, что используется человеком-оператором.

Работа настройщика построена следующим образом. На вход контура регулирования помимо задания и измеренного выхода объекта дополнительно подается испытательный сигнал вида:

$$v(t) = \begin{cases} A, & t > 2ih, \\ -A, & t > (2i+1)h, \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где  $2h$  — период испытательного сигнала, выбираемый исходя из постоянной времени объекта (1),  $A$  — амплитуда испытательного сигнала, выбираемая с учетом специфики работы объекта управления. В настройщик поступают сигналы управления с регулятора и выход объекта, они проходят через фильтры Фурье:

$$\begin{aligned} a_{yk} &= \frac{2}{\rho_k t_f} \int_{T_F}^{T_F+t_f} y(t) \sin(\omega_k t) dt & b_{yk} &= \frac{2}{\rho_k t_f} \int_{T_F}^{T_F+t_f} y(t) \cos(\omega_k t) dt \\ a_{uk} &= \frac{2}{\rho_k t_f} \int_{T_F}^{T_F+t_f} u(t) \sin(\omega_k t) dt & b_{uk} &= \frac{2}{\rho_k t_f} \int_{T_F}^{T_F+t_f} u(t) \cos(\omega_k t) dt \end{aligned} \quad (4)$$

$(k=1, 2)$

где  $T_F$  — момент начала фильтрации испытательного сигнала,  $t_f$  — время фильтрации сигнала,  $\rho_i = \frac{2A\pi}{h(2i-1)}$ ,  $\omega_i = \frac{(2i-1)\pi}{h}$ ,  $(i=1, 2)$  — параметры испытательного сигнала.

По значениям фильтров числа:

$$\alpha_i = \frac{a_{yi} a_{ui} + b_{yi} b_{ui}}{a_{ui}^2 + b_{ui}^2}, \quad \beta_i = \frac{-a_{yi} b_{ui} + b_{yi} a_{ui}}{a_{ui}^2 + b_{ui}^2}, \quad (i=1, 2), \quad (5)$$

которые дают коэффициенты объекта:

$$\begin{aligned} T^2 &= \frac{(\alpha_2^2 + \beta_2^2) - (\alpha_1^2 + \beta_1^2)}{\omega_1^2 (\alpha_1^2 + \beta_1^2) - \omega_2^2 (\alpha_2^2 + \beta_2^2)}, & k^2 &= (\alpha_2^2 + \beta_2^2)(T^2 \omega_2^2 + 1); \\ \tau &= \frac{1}{\omega_1} \arctg \frac{\beta_1 + T \alpha_1 \omega_1}{\alpha_1 - T \beta_1 \omega_1}, & \omega_1 \tau &< \frac{\pi}{2}; \end{aligned} \quad (6)$$

После завершения идентификации настройщик вносит изменения в параметры регулятора. Приводится пример применения.

### Список литературы

1. Kwang Y. Lee, Joel H. Van Sickel, Jason A. Hoffman, Won-Hee Jung, and Sung-Ho Kim. Controller Design for a 1000 MW Ultra Super Critical Once-through Boiler Power Plant. Proceedings of the 17th World Congress The IFAC, Seoul, Korea, July 6-11, 2008, p. 13938-13943.
2. Richard Dorr, Fr'ed'eric Kratz, Jos'e Ragot, Fran,cois Loisy, and Jean-Luc Germain. Detection, Isolation, and Identification of Sensor Faults in Nuclear Power

Plants. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 5, No. 1, January 1997. p. 42-60.

3. Новости ЗАО «НВТ-Автоматика». Внедрение полномасштабной АСУ ТП турбоустановки ст. № 7 Улан-Удэнской ТЭЦ-1. Автоматизация и ИТ в энергетике, № 5 (22), стр. 69-70, 2011.

4. Александров А. Г., Паленов М. В. Самонастраивающийся ПИД/И регулятор // Автоматика и телемеханика. 2011. №~10. С. 4--18.

5. Александров А. Г. Адаптивное управление объектом с запаздыванием. Труды IX Международной Четаевской конференции "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением", посвященной 105 - летию Н.Г. Четаева, том 3, Управление и оптимизация, стр. 6-13, Иркутск, 2007.

УДК 577.2, 616.72-018, 57.087

А.Ю. Алексеенко, А.А. Широкий

*Волгоградский государственный университет, Волгоград*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ РАЗВИТИЯ ОСТЕОАРТРОЗА**

### **Аннотация**

Представлен обзор основных проявлений остеоартроза, систематизированы некоторые сведения об основных молекулярно-генетических механизмах заболевания. Выделены управляющие воздействия и реперные точки приложения для регуляции остеоартроза. Предпринята попытка создания математической модели остеоартроза.

### **Актуальность проблемы**

Накопленные данные, позволяют рассматривать остеоартроз как воспалительное заболевание сустава, при котором провоцирующие факторы приводят к однотипным структурным изменениям. Клетки тканей суставного хряща имеют независимые возможности для инициирования и поддержания ответа на повреждение, приводящее к разрушению хряща.

Существует строгая регуляция скорости обновления матрикса – тонкий баланс между синтезом и разрушением. При ОА этот баланс нарушается в сторону катаболических процессов.[1]

Чтобы получить точную информацию обо всех соответствующих биомаркерах, необходимо понимание всех физиологических, анатомических, биохимических и генетических параметров которые имеют важное значение на каждом из этапов становления заболевания. Подход, описанный здесь, позволит разобраться в сложной биодинамике процесса, начиная с молекулярного уровня. Целью усилий является улучшить понимание биологических и химических систем, расширить базовые знания в области биомолекулярных взаимодействий, и перевести эту информацию в инновационные проекты поддержки новых инженерных биоматериалов, устройств и процессов.

Для моделирования опорно-двигательного аппарата акцент делается на суставной хрящ, удивительно сложный биоконструктивный материал, который обладает высокими показателями жесткости, сжатия, прочности, устойчивости и амортизации. Внеклеточный матрикс хряща содержит около 60% коллагена и 25% протеогликанов. Ещё 15% составляет широчайший спектр матричных протеинов. Архитектурная сеть коллагена обеспечивает механическую структуру хряща. Центральным звеном протеогликанов является гликозаминогликаны, а также включает хондроитин сульфат, дерматансульфат и кератансульфат, которые ковалентно связаны в гидрофильной среде. Биомолекулы внеклеточного матрикса включают различные типы факторов роста, фибронектина, ламинина и цитокины.

Физиологическое регулирование и биологическую целостность биомолекул хрящевой ткани поддерживают хондроциты, хотя их число и плотность низка. Благодаря своему расположению на поверхности сустава, суставной хрящ испытывает широкий спектр сил, которые включают сдвиг, сжатие и растяжение. Эти механические нагрузки распределяются по всей матрице хряща и поглощаются биомолекулами хряща. На наноуровне, механическое раздражение затем рассеивается и передается в хондроциты. Хондроциты затем преобразуют эти механические сигналы в биохимические сигнальные молекулы, которые затем запускают анаболические и катаболические пути. Понимание структуры, функции и регуляции хондроцитов в режиме реального времени на клеточном уровне является главной задачей решения вопроса об управлении процессом остеоартроза.

В нормальных и патологических условиях, гомеостаз матрикса суставного хряща зависит от аутокринных и паракринных регуляторных механизмов. Эти механизмы регулируют анаболические и катаболические пути контроля количества хондроцитов и внеклеточного матрикса. Хондроциты производят структурные молекулы суставного хряща, такие как коллаген и протеогликаны, которые помогают формировать ткань хряща. Одновременно клетки вырабатывают различные металлопротеиназы, такие как коллагеназа, желатиназа, стромелизин и аггрекиназа, которые регулируют состав ткани хряща. На молекулярном уровне регулирование основано на факторах роста, таких как трансформирующий фактор роста -  $\beta$  (*TGF- $\beta$* ), инсулиноподобный фактор роста-1 (*IGF-1*), и остеогенный белок-1 (ОП-1), которые стимулируют хондроциты к синтезу структурных макромолекул (анаболические пути), в то время как цитокины – интерлейкин-1 (ИЛ-1), интерлейкин-6 (*IL-6*) и фактор некроза опухоли- $\alpha$  (ФНО- $\alpha$ ) стимулируют секрецию хондроцитами протеиназ и вызывают деградацию внеклеточного матрикса (катаболических путей).[2]

Основными действующими факторами на молекулярно-генетическом уровне являются провоспалительные цитокины и ферменты, а также гены, кодирующие их. В частности, одним из основных цитокинов определяющийся в большом количестве в синовиальной жидкости и структуре хряща является ИЛ-1 $\beta$ . Биологические эффекты ИЛ-1 реализуются через специфические рецепторы на мембранах клеток. В тканях суставов за передачу сигнала отвечают рецепторы типа I, которые обладают более высокой аффинностью к ИЛ-1 $\beta$ , нежели к ИЛ-1 $\alpha$ . Дальнейшая передача сигнала обеспечивается посредством факторов активации транскрипции – семейством белков *NF- $\kappa$ B/Rel*. *NF- $\kappa$ B* существует в

цитоплазме в неактивной форме, связанной с регуляторным белком, называемым ингибитором  $\kappa B$  ( $I\kappa B$ ). За фосфорилирование  $I\kappa B$ , необходимое для активации  $NF-\kappa B$  отвечает фермент — киназа ингибитора  $\kappa B$  ( $IKK$ ). После фосфорилирования  $I\kappa B$  происходит его разрушение, высвобождение активного  $NF-\kappa B$  и его транслокация в ядро, где  $NF-\kappa B$  связывается с промоторными участками провоспалительных генов. Совместное действие  $NF-\kappa B$  с другим фактором активации —  $AP-1$  — обеспечивает усиление синтеза ферментов, разрушающих матрикс. Весь процесс можно разделить на 2 этапа. На первом этапе в результате триггерных воздействий на суставной хрящ, происходит активация т-лимфоцитов и синовиальных макрофагов, которые используя рецептор  $IL1R1$  на хондроцитах, посредством выделения  $IL-1\beta$  активируют на втором этапе факторы транскрипции  $NF-\kappa B$  и  $AP-1$  соответствующих генов.[3,4,6]

На молекулярно-генетическом уровне это можно представить как результат экспрессии и супрессии отдельных генов внутри их ограниченного множества генов, ответственных за клеточный цикл, метаболизм и межклеточную сигнализацию в хрящевой ткани.

На основании этого в нашей лаборатории была создана рабочая база данных генов, из которой были отобраны несколько ключевых генов, включающих  $MMP-13$  ( $MIM:600108$ ),  $IL1R1$  ( $MIM:147810$ ),  $IL1RA$  ( $MIM:147679$ ),  $NFKB1$  ( $MIM:164011$ ),  $NFKB2$  ( $MIM:164012$ ), связанный с  $REL$  ( $MIM:164910$ ),  $RELA$  ( $MIM:164014$ ), или  $RELB$  ( $MIM:604758$ ) для формирования  $NFKB$  комплекса, ингибитор  $\kappa B$  ( $I-\kappa B$ ) киназного комплекса  $IKK$  ( $OMIM:300248$ ),  $AP-1$  ( $MIM:603535$ ), участвующих в развитии остеоартроза, предназначенная для создания информационно-аналитической системы с возможностью экспертной оценки прогнозирования течения ОА.[5]

Восстановление тканей суставного хряща относится к одной из проблем применения тканеинженерных технологий. Эти технологии включают комбинацию биосовместимых хондроиндуктивных материалов с механизмами управления всеми процессами, необходимыми для формирования функционально полноценного суставного хряща.

### Материалы и методы

Для проверки рабочей модели системы возможно представить математическую модель в виде взвешенной суммы значений факторов, для этого на каждом из этапов, обозначим измеряемый физиологический показатель, например концентрация  $IL-1$ , в синовиальной жидкости, который характеризует степень выраженности интересующего нас производящего фактора как  $x_i$ . А показатель характеризующий величину ответной реакции системы, например концентрация  $MMP-13$  или толщина суставного хряща, как  $y_i$ . При этом количественные характеристики выраженности производящих факторов необходимо обозначаются в определенных реперных точках:

- определённый нулевой порог (минимальная концентрация цитокинов), при котором имеет место ответная реакция у системы с минимальной степенью выраженности, обозначим  $x_i^0 = x_i(0)$ ;

- возможные границы дозозависимости (имеет место развитие ОА) — увеличение степени выраженности фактора  $x_i$ , превышающее значение в этой

точке, уже не оказывает или оказывает незначительное влияние на величину ответной реакции системы, обозначим  $x_i = x_i(t)$ ;

- предельная точка воздействия, при превышении степени выраженности фактора  $x_i$  которой возможно разрушение системы, обозначим  $x_i^l = x_i(1)$ .

Таким образом, интересующие нас значения лежат в диапазоне значений параметра  $t$  от нуля до единицы. При этом значения при  $t < 0$  нас не интересуют ввиду отсутствия реакции системы (ОА не проявляется), а при  $t > 1$  возможно разрушение системы.

Множество характеристик рассматриваемых производящих факторов обозначим  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , множество характеристик ответной реакции –  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ . Если представить исследуемый биологический процесс в виде некоторого зависимого отображения  $F: X \rightarrow Y$ , то возможно развитие системы по двум вариантам.

В первом случае может оказаться, что  $n = m$  и каждый производящий фактор влияет ровно на одну характеристику ответной реакции.

$$F(X) = \begin{cases} y_1 = f_1(x_1) \\ y_2 = f_2(x_2) \\ \dots \\ y_n = f_n(x_n) \end{cases}$$

Во втором случае значения факторов будет суммироваться и зависимость может выглядеть так:

$$F(X) = \begin{cases} y_1 = f_{11}(x_1) + f_{12}(x_2) + \dots + f_{1n}(x_n) \\ y_2 = f_{21}(x_1) + f_{22}(x_2) + \dots + f_{2n}(x_n) \\ \dots \\ y_m = f_{m1}(x_1) + f_{m2}(x_2) + \dots + f_{mn}(x_n) \end{cases}$$

При этом если фактор  $x_j$  на каком либо из биологических этапов не оказывает влияния на показатель отклика системы  $y_i$ , то соответствующая функция  $f_{ij}(x_j)$  равна нулю во всей области определения.

Построим теперь для каждого показателя отклика функцию  $g_i(y_i)$ , характеризующую зависимость прироста/деградации матрикса от значения показателя отклика. При этом, если показатель  $y_i$  соответствует приросту матрикса, то значения  $g_i$  положительны, в противном случае – отрицательны. Обозначим

$$S(y_1, y_2, \dots, y_m) = \sum_i g_i$$

Тогда  $S(y_1, y_2, \dots, y_m) = 0$  соответствует здоровому хрящу. Значения  $S$ , отличные от нуля, характеризуют больной хрящ. В таком представлении задача поиска лечения сводится к минимизации  $|S|$ , то есть к решению задачи оптимизации.

### Заключение

С проблемой остеоартроза сталкиваются более 60% людей в возрасте старше 60 лет. Построение адекватной математической модели процессов, происходящих в суставном хряще, позволит эффективнее управлять этими

процессами, а также может послужить толчком к развитию новых методов лечения этого заболевания.

### Список литературы

1. Маланин Д.А., Писарев В.Б., Новочадов В.В. Восстановление поврежденных хряща в коленном суставе. – Волгоград: Волгогр. н. изд-во, 2010. – 518 с.
2. Goldring SR, Goldring MB. The role of cytokines in cartilage matrix degeneration in osteoarthritis. Clin Orthop Relat Res. 2004:S27–36.
3. Lorenz H, Richter W. Osteoarthritis: cellular and molecular changes in degenerating cartilage. Prog Histochem Cytochem. 2006;40:135–63.
4. Pritzker KP, Gay S, Jimenez SA, Ostergaard K, Pelletier JP, Revell PA, et al. Osteoarthritis cartilage histopathology: grading and staging. Osteoarthritis Cartilage. 2006;14:13–29.
5. Takahashi H., Nakajima M., Ozaki K., et al. Prediction model for knee osteoarthritis based on genetic and clinical information // Arthritis Res. Ther. – 2010. N12. - R187
6. Wu G., Zhu L., Dent J.E., Nardini C. A comprehensive molecular interaction map for rheumatoid arthritis // PLoS ONE. – 2010. - Vol. 5, N4. - e10137.

УДК 62-9

А.Л. Арутюнов

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

## МОДЕЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГТУ В ПРОИЗВОДСТВЕ

### Аннотация

В статье приведена оценка эффективности (с экономической точки зрения) от использования газотурбинных установок (ГТУ) в различных производственных процессах с целью получения электроэнергии и тепла для производственных нужд, а также для регулирования производственных затрат на энергоресурсы.

### Введение

К числу основных проблем промышленного производства в России относятся: - высокая степень коэффициенты износа и выбытия основных производственных фондов а также высокая себестоимость единицы произведенной продукции во многих отраслях промышленного производства в том числе и в сельскохозяйственном производстве. Данный эффект является следствием высокого показателя доли энергоемкости при производстве единицы промышленной продукции до 35% в структуре прочих производственных затрат. Поэтому в рамках задач по снижению производственных издержек в том числе снижения издержек на потребляемые энергоресурсы необходимы решения по диверсификации источников энергоснабжения по различным видам и технологиям получения энергоносителей. В работах [1,2,3] по комплексному анализу различных источников энергоснабжения было установлено, что наибольшей дороговизной

среди различных источников энергопотребления является – централизованное энергоснабжение промышленных предприятий при постоянном росте отпускных цен практически на все виды топлива начиная с 1995 г. (рис.1). В сложившейся ситуации для наиболее рационального и энергоэффективного потребления энергоресурсов, а также с целью оптимизации производственных затрат на крупных и средних промышленных предприятиях целесообразно создание локальных (собственных) источников энергообеспечения с использованием газотурбинных и парогазовых установок. А в сельскохозяйственном производстве на предприятиях АПК также имеет место использования биоэнергетических установок (БЭУ) по биоконсервации различных производственных отходов (т.к. АПК в среднем за год дает до 75 млн. тонн отходов), превращая их в биогаз, который в дальнейшем можно использовать в производстве, что в свою очередь определяется как безотходное производство (“замкнутый цикл”).

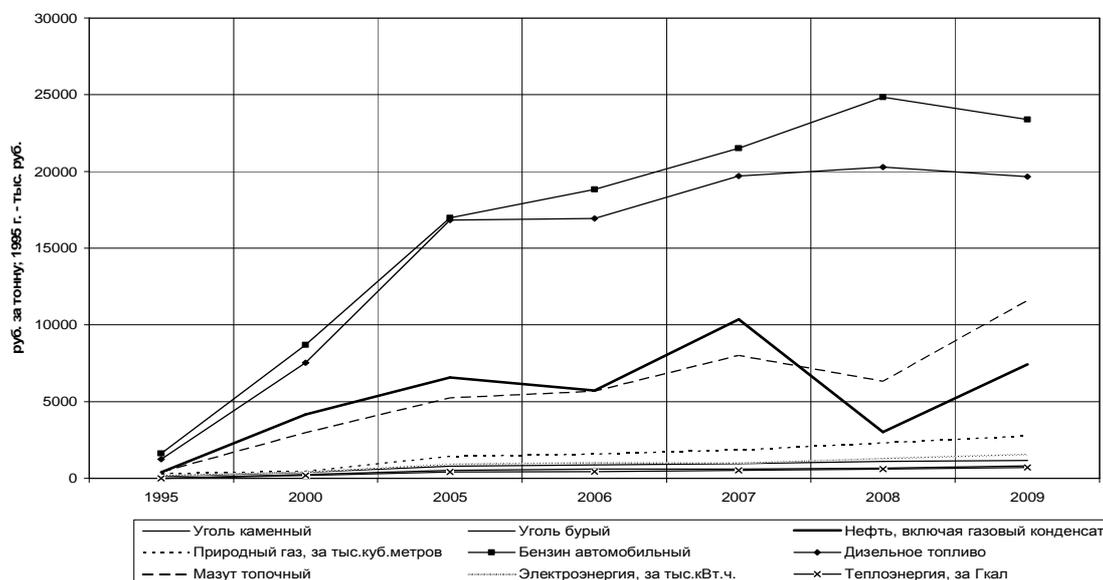


Рис. 1. Средние отпускные цена на основные виды энергоресурсов для промышленных предприятий

### Классификация видов ГТУ

На данный момент времени на рынке широко представлены различные виды ГТУ от таких крупных зарубежных производителей как: концерн Сименс и Дженерал Электрик, Хитачи, Мицубиси и Солар. Модификации основных типов ГТУ представлены на рис. 2. Наиболее эффективными на сегодняшний день установками с КПД до 50% - являются ГТУ класса LMS 100. Но основная проблема представленных на рис.2 классов ГТУ состоит в том, что установки мощностью до 30 МВт обладают КПД до 35-37% и при этом процент КПД у всех ГТУ растет с увеличением мощностей данных установок, что не совсем приемлемо для крупных (уже не говоря о средних) промышленных предприятий, т.к. для обеспечения энергоэффективного производства на предприятиях промышленности достаточно обладать мощностями до 20 МВт. Т.к. в противном случае имеет место переизбыток производственных мощностей и как следствие этого перерасход материальных средств. При этом установки мощностью

до 20-25 МВт достаточны для обеспечения в полной мере градообразующего промышленного предприятия необходимыми мощностями не только для нужд производства, но и для освещения и отопления небольшого населенного (до 20 тыс. человек) пункта. На рис. 3 показана зависимость удельной стоимости на единицу выработанной мощности (расхода энергии) от общей мощности ГТУ простого цикла. При этом общая архитектура конструкции ГТУ класса LMS 100 простого цикла представлено на рис. 4, где схематично представлены: КНД – компрессор низкого давления, КВД – компрессор высокого давления, ТВД – турбина высокого давления, ТНД – турбина низкого давления, СТ – силовая турбина.

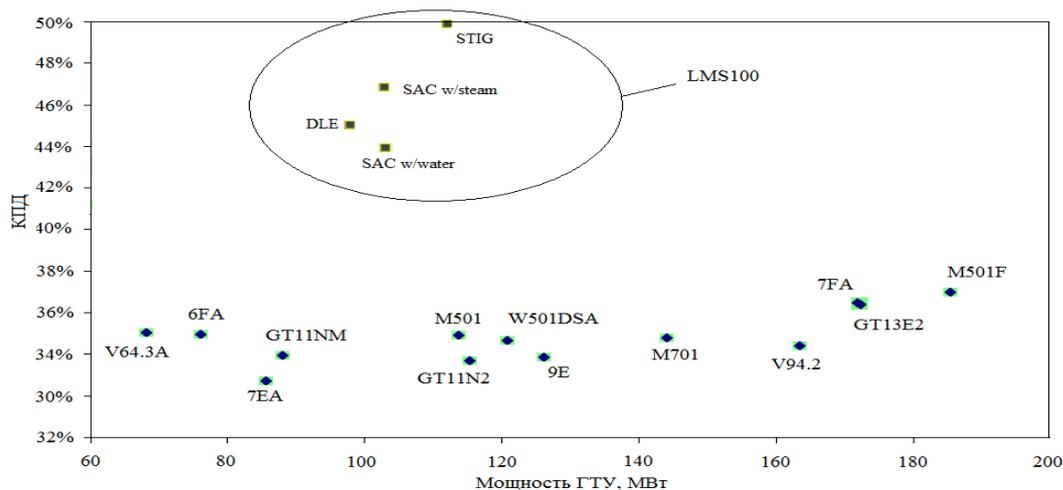


Рис. 2. Технические характеристики различных классов ГТУ

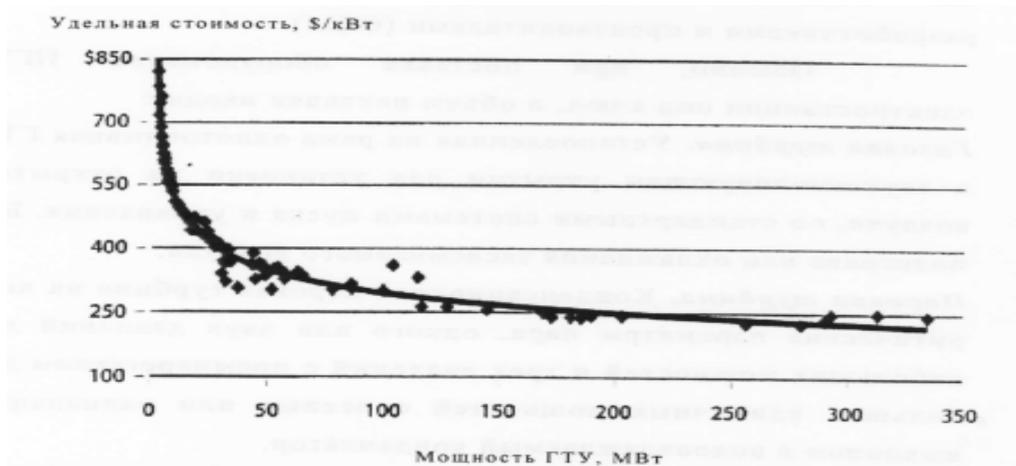


Рис. 3. Удельная стоимость ГТУ простого цикла в долл. США/кВт установленной мощности

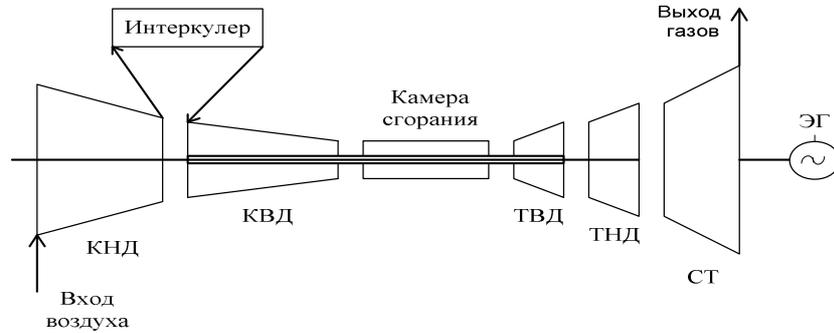


Рис. 4. Общая конструкция ГТУ простого цикла класса LMS 100

### Технико-экономические параметры ГТУ при сравнении их с другими видами источников энергоснабжения

Для конечной оценки экономической эффективности от использования различных режимов энергоснабжения и рационального использования энергоресурсов в производстве на предприятиях АПК при выборе более оптимальных вариантов комбинированной системы совместного применения основных и альтернативных видов энергоресурсов необходим расчет оценки экономической эффективности использования аккумулирующих систем в энергетике (расчет тарифов дифференцированных по временным зонам, расчет оценки эффективности аккумулирующих установок, расчет критического уровня цен на энергоресурсы (табл. 1)), т.к. уровень спроса на энергоресурсы претерпевает резкие изменения в зависимости от времени суток, дней недели и сезонов года (принято дифференцировать сутки на три периода – три временные зоны: пиковую, дневную (полупиковую) и ночную) [2]. Для покрытия спроса в эти временные зоны используются разные типы электростанций, или генерирующих установок.

Таблица 1

### Расчет оценки эффективности аккумулирующих систем в энергетике

Расчет тарифов дифференцированных по временным зонам	
1. Расчет затрат на производство 1 кВт.ч энергии ЭС $i$ -го типа	$\mathfrak{Z}_i = \frac{N_i K_i}{T} + p q_i, N_i = E + a$
2. Расчет затрат на ГТУ и ПГУ для различных часовых режимов $T_1$ и $T_2$	$\frac{N_1 K_1}{T_1} + p q_1 = \frac{N_2 K_2}{T_1} + p q_2$
	$\frac{N_2 K_2}{T_2} + p q_2 = \frac{N_3 K_3}{T_2} + Q_3$
3. Расчет оптимальной длительности работы ТЭС $i$ -го типа	$T_i = \frac{(N_{i+1} K_{i+1} - N_i K_i)}{(q_i - q_{i+1})(1/p)}, i=1,2$
Расчет оценки эффективности аккумулирующих установок	
4. Эффективность создания ТАС мощностью в 1 кВт.ч	$\mathfrak{Z}_j = (r_1 - \frac{r_2}{\eta}) - (\frac{N_\phi \Phi_j}{T_\phi}), N_\phi = E + a_\phi$
Расчет критического уровня цен на энергоресурсы	
5. Расчет исходя от оценки эффективности аккумулирующих установок	$\mathfrak{Z}_j(p) = A p + B$
	$\mathfrak{Z}_j(p) = 0 \text{ или } p^* = B / A$
6. Расчет критической цены при сравнении с ГТУ	$p^* = \frac{N_\phi \Phi_j}{(N_1 K_1 (q_1 - q_2) / N_2 K_2 - N_1 K_1) + q_1}$
7. Расчет критической цены при сравнении с ПГУ	$p^* = \frac{N_\phi \Phi_j}{(N_2 K_2 (q_2 - q_3) / N_3 K_3 - N_2 K_2) + q_2}$
8. Расчет критической цены при сопоставлении ТАС и ГТУ	$p^* = \frac{N_\phi \Phi_j}{(N_1 K_1 (q_1 - q_2) / N_2 K_2 - N_1 K_1) + q_1 - q_4}$

## Список литературы

1. Арутюнов А.Л. Энергетический комплекс. Производство и применение биотоплива в сельскохозяйственном производстве России. Состояние на рынке и перспективы. // Сборник научных трудов ЦЭМИ РАН. Выпуск 14. М.: 2009. С. 105-122.
2. Арутюнов А.Л. Изучение процессов межотраслевых потоков народного хозяйства (на примере ТЭК и АПК) методами структурного анализа // Труды VI Международной конференции MLSD. Т. 2. М.: 2012. С. 74-85.
3. Петрова М.Б. Экономические проблемы и перспективы качественного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей в России / М.: ИПП РАН, 2007 -142 с.

УДК 004.942

А.И. Ахметшин, О.В. Даринцев

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

## **СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО СОСТОЯНИЮ И УПРАВЛЕНИЮ В ОСНОВЕ МОДЕЛЬНОГО НАПОЛНЕНИЯ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА**

### **Аннотация**

В работе рассмотрено применение синтеза алгоритмов адаптивных систем управления, с эталонным упредителем и расширенной ошибкой для объекта с запаздываниями по управлению и состоянию используемого в основе модельного наполнения компьютерных тренажеров.

### **Введение**

Проектирование модельного наполнения тренажерных комплексов для подготовки и переподготовки операторов АСУ ТП часто осложнено присутствием в большинстве производственных процессов как объектов управления параметрической неопределенности, и наличием в модели объекта запаздывания во входном сигнале. На сегодняшний день моделирование технологических процессов и проблема управления объектами в условиях неопределенности – одна из фундаментальных задач теории и практики автоматического управления.

Кроме указанных сложностей, зачастую при моделировании одного узла или объекта в целом специфика технологического процесса предполагает измерение только входного и выходного сигналов объекта управления, так как прочие величины, характеризующие динамику конструктивно не доступны. Система же, должна извлекать недостающую информацию из доступных сигналов, в этом случае говорят об адаптивном управлении по входу-выходу.

## Синтез алгоритмов адаптивного управления

Пусть объект управления описывается уравнением

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A \cdot x(t) + B \cdot u(t-h) + f(t), \quad y(t) = L^T x(t), \\ u(\theta) &= 0, \quad \theta \in [-h, 0], \end{aligned} \quad (1)$$

Функционирование объекта (1) рассматривается в условиях априорной параметрической неопределенности:

$$A = A(\xi), \quad B = B(\xi), \quad L = L(\xi), \quad \xi \in \Xi, \quad (2)$$

Для компенсации отрицательного влияния запаздывания в основной контур управления вводится упредитель-компенсатор:

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = A_k x_k(t) + B_k (u(t) - u(t-h)), \quad y_k(t) = x_{k,1}(t), \quad (3)$$

Для оценки переменных состояния скалярного объекта (1), не доступных измерению, воспользуемся вспомогательным фильтром переменных состояния

$$\frac{dx_f(t)}{dt} = A_f \cdot x_f(t) + B_f(t) \cdot y(t), \quad y_f(t) = L_f^T x_f(t) + D_f y(t), \quad v(t) = g^T y_f(t), \quad (4)$$

Математическое описание объекта управления (1) в измененном базисе можно тождественно представить в виде

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = \bar{A} \cdot \bar{x}(t) + \bar{B} \cdot u(t-h) + \bar{f}(t), \quad \bar{y}(t) = \bar{L}^T \bar{x}(t), \quad v(t) = g^T \bar{y}(t), \quad (5)$$

Желаемая динамика движения объекта (1) описывается неявной эталонной моделью

$$\frac{dx_*(t)}{dt} = A_* \cdot x_*(t) + B_* \cdot q(t), \quad y_*(t) = g^T \bar{L}^T x_*(t), \quad (6)$$

В расширенном пространстве состояний упредитель-компенсатор будет описываться в виде

$$\frac{d\bar{x}_k(t)}{dt} = \bar{A}_k \bar{x}_k(t) + \bar{B}_k (u(t) - u(t-h)), \quad \bar{y}_k(t) = \bar{L}^T \bar{x}_k(t), \quad v_k(t) = g^T \bar{y}_k(t) \quad (7)$$

Закон управления зададим в следующем виде [1]

$$u(t) = \chi(t)q(t) - (C^T(t)\bar{y}(t) + k(t)u(t-h) + \lambda(t)y_k(t)), \quad (8)$$

Первый этап синтеза. Вводится сигнал рассогласования

$$e(t) = x_*(t) - (\bar{x}(t) + \bar{x}_k(t)), \quad (9)$$

Введя обозначение, получим эквивалентное математическое описание системы

$$\begin{cases} \frac{d\bar{v}(t)}{dt} = A_* e(t) + \chi_0 B_* \cdot \mu(t), & \bar{v}(t) = y_*(t) - (v(t) + v_k(t)), \\ \mu(t) = -\left(\chi(t) - \frac{1}{\chi_0}\right) q(t) + \left(C(t) - \frac{1}{\chi_0} C_0\right)^T \bar{y}(t) + (k(t) - k_0) u(t-h) + \left(\lambda(t) - \frac{\lambda_0}{\chi_0}\right) y_k(t), \end{cases} \quad (10)$$

где  $\mu(t)$  – нелинейная нестационарная часть эквивалентной системы,  $\bar{v}(t)$  – обобщенный выход, который можно записать

$$\bar{v}(t) = \frac{g^T \bar{L}^T (sE_n - A_*)^+ \bar{B}_k}{\det(sE_n - A_*)} \cdot \mu(t). \quad (11)$$

Второй этап синтеза. Учитывая явно-неявную форму записи упредитель - компенсатора и условия структурного согласования (7), для (11) справедливо следующее равенство:

$$\bar{v}(s) = \frac{\chi_0}{(a_k(s) - \lambda_0)} \cdot \mu(s), \quad (12)$$

Таким образом,

$$\bar{v}(t) = \frac{\chi_0}{(a_k(s) - \lambda_0)} \cdot \frac{D(s)}{D(s)} \cdot \mu(t) = \frac{\chi_0 \cdot D(s)}{(a_k(s) - \lambda_0)} \cdot D^{-1}(s) \mu(t), \quad (13)$$

Расширенный сигнал рассогласования, учитывая (12) и (13), примет вид

$$\varepsilon(t) = \bar{v}(t) + \xi(t), \quad (14)$$

а эквивалентное математическое описание системы относительно расширенной ошибки (14) запишется следующим образом:

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = \frac{\chi_0 \cdot D(s)}{(a_k(s) - \lambda_0)} \cdot \hat{\mu}(t), \\ \hat{\mu}(t) = -\left(\chi(t) - \frac{1}{\chi_0}\right) \hat{q}(t) + \left(C(t) - \frac{1}{\chi_0} C_0\right)^T \hat{y}(t) + (k(t) - k_0) \hat{u}(t-h) + \left(\lambda(t) - \frac{\lambda_0}{\chi_0}\right) \hat{y}_k(t), \end{cases} \quad (15)$$

Третий этап синтеза. Для эквивалентной системы (15) вводится присоединенная система, для которой должно выполняться интегральное неравенство В.М. Попова имеющее, с учетом (15), следующий вид:

$$\begin{aligned} \eta(0, t) = & -\int_0^t \hat{\mu}(\theta) \varepsilon(\theta) d\theta = -\int_0^t \left(C(\theta) - \frac{1}{\chi_0} C_0\right)^T \hat{y}(\theta) \varepsilon(\theta) d\theta - \int_0^t (k(\theta) - k_0) \hat{u}(\theta-h) \varepsilon(\theta) d\theta - \\ & - \int_0^t \left(\lambda(\theta) - \frac{\lambda_0}{\chi_0}\right) \hat{y}_k(\theta) \varepsilon(\theta) d\theta + \int_0^t \left(\chi(\theta) - \frac{1}{\chi_0}\right) \hat{q}(\theta) \varepsilon(\theta) d\theta. \end{aligned} \quad (16)$$

Алгоритмы настройки параметров регулятора (10) синтезируются в виде

$$\begin{aligned} \frac{dC_i(t)}{dt} &= -\alpha_i \hat{y}(t) \varepsilon(t), & \frac{dk(t)}{dt} &= -\beta_1 \hat{u}(t-h) \varepsilon(t), \\ \frac{d\lambda(t)}{dt} &= -\tau_1 \hat{y}_k(t) \varepsilon(t), & \frac{d\chi(t)}{dt} &= \pi_1 \hat{q}(t) \varepsilon(t), \end{aligned} \quad (17)$$

Четвертый этап синтеза. Из выполнения условия строгой положительной определенности линейной стационарной части эквивалентной системы и инте-

гравного неравенства (16) следует, что система (1), (3), (4), (6), (8), (17) является асимптотически гиперустойчивой, и имеют место предельные неравенства, при этом алгоритмы (24) будут описываться следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} \frac{dC_i(t)}{dt} &= -\alpha_{0i}C_i(t) - \alpha_i\hat{y}(t)\varepsilon(t), & \frac{dk(t)}{dt} &= -\beta_0k(t) - \beta_1\hat{u}(t-h)\varepsilon(t), \\ \frac{d\lambda(t)}{dt} &= -\tau_0\lambda(t) - \tau_1\hat{y}_k(t)\varepsilon(t), & \frac{d\chi(t)}{dt} &= -\pi_0\chi(t) + \pi_1\hat{q}(t)\varepsilon(t), \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\alpha_{0i} = const > 0, i = 1, \dots, n; \beta_0, \tau_0, \pi_0 = const > 0$ .

### Применение синтеза к построению модельного наполнения ТК

В качестве объекта управления возьмем узел регулирования подогрева этилена, структурная схема которого приведена на рис.1.

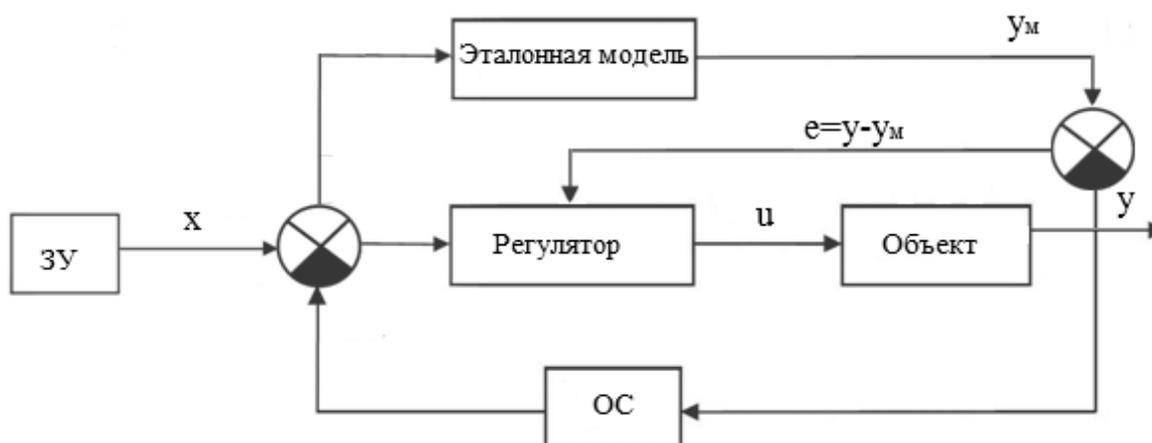


Рис. 1. Структурная схема узла регулирования подогрева этилена

Описание приведенной системы автоматического регулирования осложнено параметрической неопределенностью, и наличием в модели объекта запаздывания во входном сигнале. Для формирования модельного наполнения компьютерного тренажера показанного на рис.1 понабиться решение множества динамических систем нелинейных дифференциальных уравнений состояния для описания фазовых переходов, уравнений тепло и массообменных процессов, уравнений теплового и материального баланса компонентов продуктов и т.д. Применение синтеза алгоритмов адаптивного управления, с эталонным упредителем и расширенной ошибкой для объекта с запаздываниями по управлению позволит обеспечить заданное качество управления неустойчивым объектом. Дополнительным преимуществом использования синтеза адаптивных алгоритмов является не единственным, и их семейство может быть расширено, в частности, за счет видоизменения интеграла Попова.

### Заключение

В работе рассмотрен синтез алгоритмов адаптивных систем управления, с эталонным упредителем и расширенной ошибкой для объекта с запаздываниями по управлению и состоянию. Результаты синтеза приведенных алгоритмов показывают, что при внешних возмущениях использование адаптивных алго-

ритмов настройки параметров регуляторов, неявных эталонных моделей и схемы с расширенной ошибкой позволяют значительно повысить адекватность формирования модельного наполнения компьютерных тренажеров для подготовки и переподготовки операторов АСУ ТП.

### Список литературы

1. Еремин Е.Л. Синтез адаптивных систем для скалярных объектов с запаздыванием по управлению / Е.Л. Еремин, Д.А. Теличенко, Л.В. Чепак. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006. – 240 с.

2. Чепак Л.В., Мезенцева А.В. Адаптивная система с неявной эталонной моделью для объекта с запаздыванием по управлению в схеме с расширенной ошибкой. // Информационные системы и технологии. – 2011. №8 - С. 132 – 138

УДК 336.7

П.А. Бирюкова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

<sup>2</sup>Институт системного анализа РАН, Москва

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СХЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-ХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ

### Аннотация

Представляемая работа продолжает начатый в [4] финансово-инженерный анализ инновационного проекта плазменно-химической углубленной переработки нефти, предложенного в [9]. Показана возможность существенного увеличения прибыли нефтеперерабатывающего завода за счёт установки дополнительной ректификационной колонны, обслуживающей плазменно-химический реактор. На основе полученных в представляемой работе аналитических и численных решений оптимизационных инженерных и финансово-инженерных задач сделаны качественные выводы о народнохозяйственной перспективности и финансовой реализуемости анализируемого инновационного проекта.

### Введение

Плазменно-химический реактор, разработанный и апробированный В.Г.Певговым [4], расщепляет тяжёлые фракции после первичной нефтепереработки, увеличивая итоговый выход востребованных лёгких фракций и улучшая качество производимых нефтепродуктов. Реактор работает в паре с традиционной ректификационной колонной, которая возгонкой выделяет из расщепленной смеси лёгкие и тяжёлые фракции.

Прежняя схема, рассмотренная Ф.А.Дружининым, В.В.Токаревым и В.Г.Певговым [9], предполагала изъятие одной или нескольких колонн из тра-

диционного цикла для обслуживания плазменно-химического реактора, что уменьшало мощность завода по переработке сырой нефти.

В модифицированной схеме такого изъятия не производится, а для обслуживания реактора устанавливается дополнительная колонна. Благодаря этому мощность завода не падает, но возрастают единовременные затраты, поэтому окончательный ответ о сравнительной эффективности двух схем не очевиден.

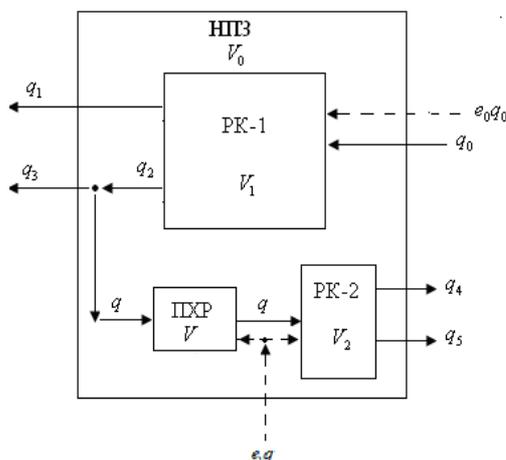


Рис. 1. Схема нефтяных потоков на заводе (НПЗ) с плазменно-химическим реактором (ПХР)

РК-1 – ректификационные колонны, используемые в традиционном цикле нефтепереработки,

ПХР – плазменно-химический реактор (установка),

РК-2 – дополнительная ректификационная колонна, обслуживающая установку.

Благодаря повторному расщеплению в реакторе части  $q$  потока тяжёлых фракций глубина переработки нефти возрастает с  $\alpha_0 = q_1 / q_0$  до  $\alpha = (q_1 + q_4) / q_0 = \alpha_0 + \alpha_1 (q / q_0)$ , где  $\alpha_1$  – доля лёгких фракций на выходе из реактора ПХР (совпадает с долей  $q_4 / q$  лёгких фракций после разделения в колонне РК-2). Далее все потоки полагаются стационарными.

### Результаты решения инженерной задачи

Задача максимизации прибыли завода по мощности реактора  $V$  и потокам  $q_0, q$  решается по этапам. Сначала при фиксированной мощности  $V$  находятся оптимальные потоки  $q_0$  сырой нефти и тяжёлых фракций  $q$  из решения задачи линейного программирования о максимизации текущей прибыли:

$$F = d_0 q_0 + d_1 q \Rightarrow \max \text{ по } (q_0, q) \in Q(V), \quad (1)$$

$$Q(V) = \{(q_0, q) : q_0 \leq V_0, q \leq V, q \leq (1 - \alpha_0) q_0; q_0, q, V \geq 0\}$$

где  $d_0 = [\alpha_0 (c_1 - c_2) + c_2 - c_0] T > 0$  – прибыльность первичной переработки,

$d_1 = [\alpha_1 (c_1 - c_2) - c_3] T > 0$  – прибыльность вторичной переработки,

$c_i$  – цены,  $T$  – продолжительность эксплуатации реактора,  $V_0$  – номинальная мощность завода.

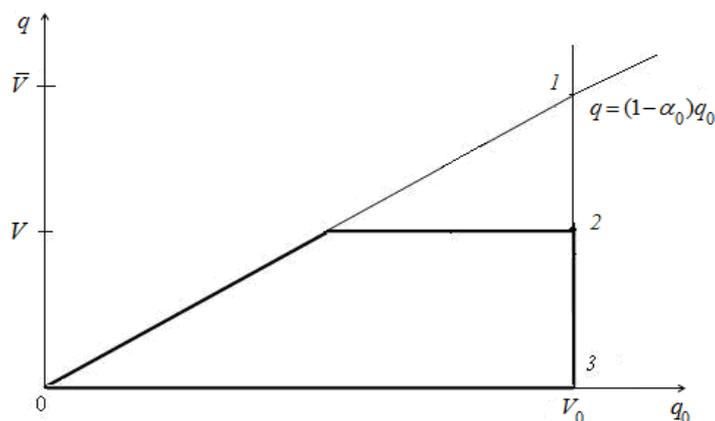


Рис. 2. Область допустимых потоков  $q_0, q$ : 1 – при  $v \geq \bar{v}$ , 2 – при  $0 < v < \bar{v}$ , 3 – при  $v = 0$

Далее, с найденной функцией максимумов  $\tilde{F}(V)$  максимизируется по  $V$  прирост  $f$  итоговой прибыли по сравнению с номиналом  $F_0 = d_0 V_0$  после вычитания единовременных затрат  $\varphi$  на реактор и колонну РК-2:

$$f = \tilde{F} - F_0 - \varphi(V) = d_1 \min\{V; (1 - \alpha_0)V_0\} - \varphi(V) \Rightarrow \max \text{ по } V \geq 0, \quad (2)$$

где  $\varphi(V) = \begin{cases} 0 & \text{при } V = 0, \\ a + lV & \text{при } V > 0, \end{cases}$  – объём единовременных затрат,

$f(V)$  – разрывная кусочно-линейная целевая функция.

Тогда получаются:

$$V^* = \arg \max_{V \geq 0} f(V) = \begin{cases} \bar{V}, & \text{если } d_1 > \underline{d}_1, \\ 0, & \text{если } d_1 \leq \underline{d}_1, \end{cases} \quad (3)$$

– оптимальная мощность реактора,

где  $\bar{V} = (1 - \alpha_0)V_0$  – предельная безызбыточная мощность реактора, обеспечивающая  $q = q_2$ .

$$f^* = \max_{V \geq 0} f(V) = \max\{0; f(\bar{V})\} = \begin{cases} d_1 \bar{V} - \varphi(\bar{V}), & \text{если } d_1 \geq \underline{d}_1, \\ 0, & \text{если } d_1 \leq \underline{d}_1, \end{cases} \quad (4)$$

– максимальный прирост итоговой прибыли за счёт повышения доли выхода дорогих лёгких фракций.

Оптимальная мощность реактора увеличивается в  $(2 - \alpha_0)$  раз до значения  $\bar{V} = (1 - \alpha_0)V_0$  по сравнению с прежней схемой, т.е. при средней по России глубине переработки  $\alpha_0 = 0,65$  – в 1,35 раза.

**Сравнение эффективности изученной ранее схемы 1 (с переключенной колонной РК-2) и рассматриваемой схемы 2 (с дополнительной колонной РК-2)**

Одинаковое повышение глубины переработки нефти с исходного уровня  $\alpha_0$  до  $\bar{\alpha} = \alpha(\bar{V}) = \alpha_1 + (1 - \alpha_1)\alpha_0$  для обеих схем достигается при оптимальном выборе мощности реактора.

Различный прирост итоговой прибыли завода возникает из-за отличающихся поведений текущей прибыли (в схеме 1 – снижение традиционной прибыли по причине переключения части колонн РК-1 в состав колонн РК-2; в схеме 2 традиционная прибыль остаётся постоянной) и различающихся единовременных затрат ( в схеме 1 – только на реактор, в схеме 2 – ещё и на колонну РК-2, составляя при этом только 0,1 % от исходного объёма прибыли).

Область  $A^{(1)}$  – выгоды схемы 1:

$$k_1 > k_0 + \psi^{(1)}, \text{ где } \psi^{(1)} = \frac{1}{T} \left[ l^{(1)} + \left( \frac{2 - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right) \frac{a^{(1)}}{V_0} \right]; \quad (5)$$

Область  $A^{(2)}$  – выгоды схемы 2:

$$k_1 > \frac{1}{1 - \alpha_0} \psi^{(2)}, \text{ где } \psi^{(2)} = \frac{1}{T} \left[ l^{(2)} + \frac{1}{1 - \alpha_0} \frac{a^{(2)}}{V_0} \right]. \quad (6)$$

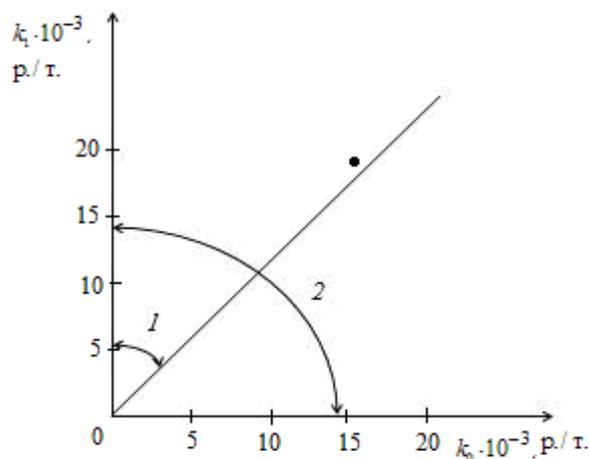


Рис. 3. Области выгоды схем 1 и 2 при  $T \rightarrow +\infty$

Проводится сравнение нижних границ  $\alpha_1^{(k)}$  выгоды на плоскости  $(\alpha_0, \alpha_1)$  для схем 1 и 2 при конечном времени  $T$ : они повышаются для обеих схем по мере возрастания  $\alpha_0$ , но обычно  $\alpha_1^{(1)} > \alpha_1^{(2)}$ , кроме нереальной ситуации, когда  $\varphi^{(2)} > \varphi^{(1)}$ ;

Анализируются приросты прибыли в сравниваемых схемах: схема 2 при  $T \rightarrow +\infty$  выигрывает больше, чем вдвое у схемы 1 в любой точке  $A^{(1)}$ , отношение  $(f^{(2)} / f^{(1)})$  становится неограниченно большим в  $A^{(2)} \setminus A^{(1)}$ ;

Прирост прибыли завода в характерной точке составляет для схемы 2 на границе 38% от номинальной прибыли завода, вместо 2% для схемы 1, что свидетельствует о высокой эффективности проекта.

### Условия финансовой реализуемости проекта

В финансово-инженерной задаче из итоговой прибыли вычитаются ещё выплаты процентов за кредит  $K$  по ставке  $\gamma$ :

$$\pi = d_0 q_0 + d_1 q - \varphi(V) - \gamma K \Rightarrow \max \text{ по } q_0, q, V, K, \quad (7)$$

и добавляются условия финансовой реализуемости из общей теории эффективности инновационных проектов:

- 1) о достаточной прибыльности проекта,
- 2) о достаточности кредита,
- 3) о неотрицательности итогового счета завода,
- 4) о неотрицательности изменения прибыли завода.

В зависимости от запаса собственных средств  $S$  и ставки  $\gamma$  оказывается выгодной одна из трёх стратегий поведения завода:

Стратегия 1 – собственных средств достаточно, чтобы реализовать инженерно - оптимальную мощность установки  $\bar{V}$ , не прибегая к кредиту:

$$V^{(1)} = \bar{V}, K^{(1)} = 0, f^{(1)} = \gamma_1 \bar{S} - (1 + \gamma_1)a \text{ при } S \geq \bar{S} = \varphi(\bar{V}); \quad (8)$$

Стратегия 2 – реализуется инженерно-оптимальная мощность установки  $\bar{V}$ , а недостаток собственных средств компенсируется кредитом по допороговой ставке  $\gamma \leq \gamma_1$ :

$$V^{(2)} = \bar{V}, K^{(2)} = \bar{S} - S, f^{(2)} = \gamma_1 \bar{S} - \gamma(\bar{S} - S) - (1 + \gamma_1)a \text{ при } S \leq \bar{S}; \quad (9)$$

Стратегия 3 – кредит невыгоден из-за сверхпороговой величины ставки  $\gamma > \gamma_1$ , мощность установки уменьшается по сравнению с  $\bar{V}$ :

$$V^{(3)} = \frac{S - a}{l}, K^{(3)} = 0, f^{(3)} = \gamma_1 S - (1 + \gamma_1)a \text{ при } S \leq \bar{S}, \gamma \geq \gamma_1. \quad (10)$$

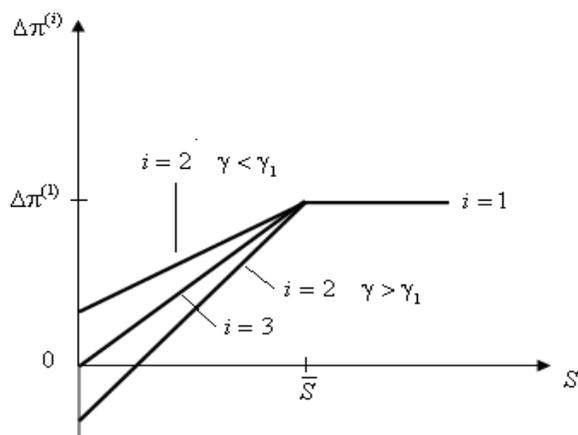


Рис. 4. Сравнение стратегий по приросту прибыли

Значительное снижение прироста прибыли происходит из-за нехватки собственных средств и увеличения процента за кредит. Сверхпороговое увели-

чение процентной ставки заставляет отказаться от кредита и идти на снижение оптимальной мощности реактора.

### Оптимальное гарантирующее планирование мощности реактора в условиях неточного прогнозирования цен и других исходных данных

Выделяются два этапа принятия управленческих решений:

1. Этап проектирования и производства ПХР (необходимо выбрать мощность реактора);
2. Этап эксплуатации (необходимо нефтяными потоками на заводе).

Мощность реактора  $V$  выбирается по принципу максимально гарантированного результата, измеряемого объемом итоговой прибыли:

$$\pi^0 = \max_{V \geq 0} [\min_{\xi \in \Xi} \pi(V, \xi)], \quad (11)$$

где  $\pi = \tilde{F} - \varphi$ ,

$\tilde{F}$  – максимальный объем текущей прибыли завода в предположении точного знания  $\xi$  на этапе эксплуатации,

$$\varphi(V) = \begin{cases} 0 & \text{при } V = 0, \\ a + lV & \text{при } V > 0, \end{cases} \quad \text{– затраты на проектирование и производство ре-$$

актора и приобретение колонны РК-2,

$\Xi = \{\xi = (\alpha_j, c_j, V_0, \varphi, T)\}$  – множество исходных параметров, неточно известных на этапе проектирования.

После аналитического отыскания наихудших значений  $\xi^*$  находятся

$$\pi^0 = \pi_0^* + \begin{cases} d_1^* V^0 - \varphi^*(V^0), & \text{если } d_1^* \geq \beta^*, \\ 0, & \text{если } d_1^* \leq \beta^*, \end{cases} \quad (12)$$

– максимальная гарантированная прибыль;

$$V^0 = \begin{cases} (1 - \alpha_0^*) V_0^*, & \text{если } d_1^* > \beta^*, \\ 0, & \text{если } d_1^* \leq \beta^*, \end{cases} \quad (13)$$

– оптимальная гарантирующая мощность реактора.

Здесь максимальная гарантированная оценка эффективности достигает наивысшего уровня гарантированной оценки эффективности идеального управления с полной информацией.

### Заключение

Таким образом, в результате решения построенной задачи математического программирования найдена оптимальная мощность реактора, оказавшаяся большей, чем в прежней схеме. Построены области преимущественного использования двух сравниваемых схем. В реалистичной части этих областей получено десятикратное превосходство новой схемы над прежней по приращению прибыли завода. Сам этот прирост в характерной точке составил 38% от номинальной прибыли завода, что свидетельствует о высокой эффективности проекта. Рассмотренные далее условия финансовой реализуемости проекта свидетельствуют о ключевой роли запаса собственных средств завода и величины

процента за кредит. Нехватка собственных средств и увеличение процента за кредит приводит к существенному снижению прироста прибыли. А сверхпороговое увеличение процентной ставки заставляет отказаться от кредита и идти на снижение оптимальной мощности реактора. Также в работе произведено оптимальное гарантирующее планирование мощности ректора в условиях неточного прогнозирования цен и других исходных данных.

### Список литературы

1. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика. – М.: Дело, 2002.
2. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М.: Наука, 1971.
3. Доклад Минэкономразвития об итогах социально-экономического развития РФ в 2010 году ([energo-news.ru/archives/49922](http://energo-news.ru/archives/49922)).
4. Дружинин Ф.А., Кочина Л.В., Токарев В.В., Певгов В.Г. Финансово-инженерный анализ инновационного проекта плазменной углубленной переработки нефти // Препринт №2.М.: МФТИ, 2011. – 40 с.
5. Дружинин Ф.А., Токарев В.В. Инженерное проектирование и финансирование инноваций – финансово-инженерный оптимум // Препринт № 1. – М.: МФТИ, 2011.
6. Дружинин Ф.А., Токарев В.В. Финансовая реализуемость инновационных проектов в игровой постановке // Труды МФТИ – 2011. – Т.3, №2. – С.84-96.
7. Иванов Ю.Н., Токарев В.В., Уздемир А.П. Математическое описание элементов экономики. – М.: Наука, 1994.
8. Орлова Е.Р. Оценка инвестиций. – М.: Международная академия оценки и консалтинга, 2005.
9. Певгов В.Г. Способ плазмохимической переработки сырья органического или растительного происхождения. Заявка на патент № 20101131660 от 28.07.2010 г.
10. Портал «Нефтяное обозрение» (<http://www.oilreview.ru/ngd.html>)
11. Соколов А.В., Токарев В.В. Методы оптимальных решений. – Т. 1. – М.: Физматлит, 2010.
12. Специализированный журнал «Бурение и нефть» (Официальный сайт: <http://burneft.ru/>)
13. Токарев В.В. Методы оптимальных решений. – Т. 2. – М.: Физматлит, 2010.
14. Токарев В.В. Совместный выбор плана и экономического механизма в условиях неопределенности // АиТ. – 1986. – № 4.

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ И ПОЛОСЫ ОТВОДА ПРИ УЧЕТЕ ОГРАНИЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ СТРУКТУРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ<sup>1</sup>**

### **Аннотация**

Рассматривается задача прогнозирования состояния железнодорожных путей (ж/д-путей) и полосы отвода при учете ограничений. Алгоритм решения задачи прогнозирования состояния железнодорожных путей и полосы отвода опирается на метод структурного прогнозирования.

### **Введение**

Среди множества существующих систем управления, следует выделить крупномасштабные системы управления, функционирующие в условиях большой информационной размытости и не определенности. Примером такой системы является холдинг ОАО «РЖД». Развитие данной транспортной сети – один из важнейших факторов экономического роста России. Ввиду этого задачи, связанные с повышением безопасности перевозочных процессов, одни из приоритетных. При этом решения этих задач в значительной степени опираются на методы прогнозирования.

### **Содержательная постановка задачи**

Целью прогнозирования состояния железнодорожных путей является осуществление предсказаний будущих состояний интересующих участков ж/д-путей. Задачу прогнозирования, о которой идет речь, можно исследовать как задачу структурного прогнозирования [3], где вопрос прогноза рассматривается в форме отнесения будущего состояния искомого объекта к одной определенной градации из нескольких возможных.

В результате анализа нынешней практики организации профилактических ремонтных работ на ж/д-путях была сформулирована новая трактовка проблемы структурного прогнозирования для данной задачи. В данной трактовке накладываются ограничения на прогноз будущего состояния участков ж/д-путей, т.е. запрещаются переходы из данной градации в градацию с более хорошими параметрами., в виду этого процесс изменения состояния участков ж/д-путей и полосы отвода исследуется как деградирующий процесс. Это позволяет прогнозировать именно ухудшение состояния ж/д-путей и полосы отвода, а на этом основании формировать новую стратегию планирования профилактических ремонтов.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 11-07-13137-офи-м-2011-РЖД.

## Структурно-классификационное прогнозирование с ограничениями на переходы в пространстве критериев

Сначала осуществляется сбор так называемых первичные показателей («сырые» данные), из которых затем с помощью методов экстремальной группировки параметров [4] формируется значительно меньшее число информативных параметры (факторов). Далее с применением экспертно-классификационных процедур [5] на базе этих наборов первичных показателей и факторов формируется  $S$  критериев  $F^{(j)}$  оценки качества линейных участков ж/д-путей. Значения критериев  $F^{(j)}$  оцениваются в бальных шкалах.

Связи между критериями и системой информативных параметров задаются формулами вида:

$$F^{(j)} = \sum_{i=1}^K \beta_{ij} f_i, j = \overline{1, S}, \quad (1)$$

где  $\beta_{ij}$  - силы связи,  $f_i$  - первичные показатели, факторы.

Затем с помощью метода автоматической классификации [6] производится классификация оцениваемых объектов.

Далее на примере одного участка строится алгоритм структурного прогнозирования для решения проблемы прогнозирования состояния данного участка.

Для этого в момент времени  $t_1$  с помощью комплексного алгоритма автоматической классификации производится структуризация  $n$  точек в пространстве критериев  $(F^{(1)}, F^{(2)}, \dots, F^{(s)})$  на  $r$  классов, каждый из которых характеризует определенное состояние линейного участка этого «типа». Число классов  $r$  выбирается с помощью человеко-машинной процедуры, входящей в комплексный алгоритм автоматической классификации. Вводится понятие эталона класса  $a_i, i \in \overline{1, r}$  [7]. Для текущего момента времени эталоны классов считаются фиксированными. Для каждой из  $n$  точек кроме принадлежности к классу вычисляются расстояния до эталонов всех классов  $R_{iv}(t), i \in \overline{1, r}; v \in \overline{1, n}$ .

В момент времени  $t_2$  каждая точка  $F_v(t_2)$  с помощью одного из алгоритмов распознавания образов с учителем относится к некоторому классу в рамках классификации, полученной на первом шаге. В рассматриваемом случае необходимо наложить ограничение на выбор класса, т.е. точка может отнестись только к тому классу, в котором

$$F_v(t_2) \leq F_v(t_1), \quad (2)$$

т.е. все значения критериев точки  $F_v(t_2) = (F_v^{(1)}(t_2), F_v^{(2)}(t_2), \dots, F_v^{(s)}(t_2))$  не больше соответствующих значений критериев точки  $F_v(t_1) = (F_v^{(1)}(t_1), F_v^{(2)}(t_1), \dots, F_v^{(s)}(t_1))$  (рис. 1).

Для этого используется алгоритм метода потенциальных функций, который в спрямляющем пространстве эквивалентен алгоритму ближайшего среднего [7].

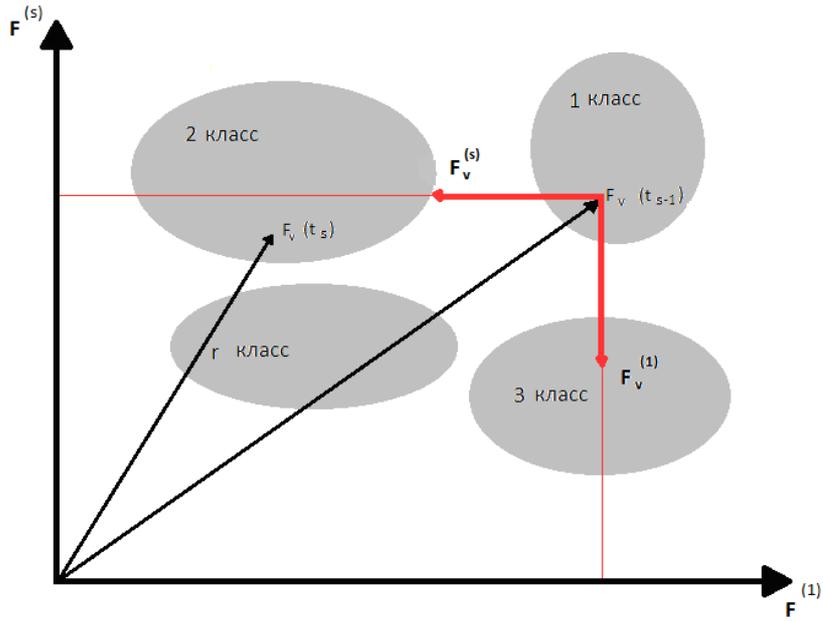


Рис. 1. Модель распределения точек  $F_v$  по классам в момент времени  $t_s$

Требуется, располагая информацией о состоянии  $F_v(t)$  в данный момент времени  $t$  линейного участка, спрогнозировать номер класса, к которому он отнесется в следующий момент времени  $t + \Delta t$  (здесь величина  $\Delta t$  не обязательно мала, но соответствует сложившейся практике периодического контроля ж/д-путей).

### Алгоритм прогнозирования

В качестве прогнозной модели для линейного участка используется марковская цепь с  $r$  состояниями и для интервала перехода  $\Delta t$  рассчитываются оценки элементов матрицы переходных вероятностей  $\hat{P} = \|\hat{p}_{iv}\|, i \in \overline{1, r}; v \in \overline{1, n}$ . Пусть для точек  $F_v(t)$  подсчитаны расстояния до эталонов

$$R_{iv} = \begin{cases} \infty, & \text{если } \forall F_k \in A_i: F_k > F_v(t_1) \text{ в смысле (2)} \\ R(F_v(t), a_i), & \text{если } \exists F_k \in A_i: F_k \leq F_v(t_1) \text{ в смысле (2)} \end{cases}, i \in \overline{1, r}; v \in \overline{1, n}. \quad (3)$$

Тогда элементы матрицы переходных вероятностей  $\hat{P} = \|\hat{p}_{iv}\|$  рассчитываются следующим образом:

$$\hat{p}_{iv} = \frac{\alpha_v}{R_{iv}}, \quad (4)$$

где нормирующий множитель  $\alpha_v$  определяется выражением:

$$\alpha_v = \frac{1}{\sum_{i=1}^r \frac{1}{R_{iv}}}. \quad (5)$$

Следовательно, элементы матрицы переходных вероятностей, которым соответствуют  $R_{iv} = \infty, \hat{p}_{iv} = 0$ .

Оценка матрицы переходных вероятностей  $\hat{P}$  используется для прогнозирования принадлежности линейного участка к тому или иному классу в следующий момент времени (по максимальному значению вероятности перехода).

### **Заключение**

В качестве базисного подхода к решению проблемы прогнозирования состояния железнодорожных путей и полосы отвода выбран метод структурно-классификационного прогнозирования.

Сформулированная трактовка проблемы структурного прогнозирования, при исследовании задачи прогнозирования состояния ж/д-путей и полосы отвода с учетом ограничений, позволяет формировать новую стратегию планирования профилактических ремонтов.

Адекватным инструментом для построения экспертно-аналитической модели для прогнозирования состояния железнодорожных путей и полосы отвода является совокупность методов интеллектуального анализа данных на базе экспертно-классификационных и экспертно-статистических методов обработки информации.

### **Список литературы**

1. Бауман Е.В., Дорофеюк А.А. Классификационный анализ данных / Труды международной конференции по проблемам управления. Том 1. – М.: СИНТЕГ, 1999. – С. 62-67.
2. Большая энциклопедия транспорта в восьми томах. Железнодорожный транспорт. Т.4. – М.: Большая российская энциклопедия, 2003. – 1040 с.
3. Левин Д.Ю., Мандель А.С. Современные требования к безопасности перевозок на железнодорожном транспорте и проблема анализа состояния железнодорожного полотна и полосы отвода. / Труды Третьей российской конференции с международным участием “Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения”. – М.: ИПУ РАН, 2012 (на CD). – С. 1632-1643.
4. Дорофеюк Ю.А. Комплексный алгоритм автоматической классификации и его использование в задачах анализа и принятия решений // Таврический вестник информатики и математики. Международное периодическое издание КНЦ НАН Украины. 2008. № 1. – С. 171-177.
5. Мандель А.С. Экспертно-статистические методы обработки информации в интегрированных системах управления производством и технологическими процессами // Проблемы управления. – 2006. – №6. – С. 55 – 59.
6. Дорофеюк А.А., Дорофеюк Ю.А. Методы структурно-классификационного прогнозирования многомерных динамических объектов / Искусственный интеллект, № 2, 2006. – С. 138-141.
7. Бауман Е.В., Дорофеюк А.А. Классификационный анализ данных // Тр. междунар. конф. по проблемам управления. Том 1. – М.: СИНТЕГ, 1999. – С. 62-67

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТРЕБНОСТЕЙ НПЗ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### Аннотация

В данной статье рассматривается задача о построении расписания работы установок на модели НПЗ для сокращения расходов на электроэнергию при заданном множестве режимов работы установок и задачах на получение продуктов в определённые моменты времени. Решение производится при помощи комбинирования генетического алгоритма и симплекс-метода.

### Введение

При переработке нефти на нефтеперерабатывающих заводах очень важно не просто использование существующих нефтяных ресурсов, а их переработка с точки зрения эффективности затрачиваемых ресурсов и оптимального планирования на нефтеперерабатывающих заводах [1]. Также определение потребления электроэнергии крайне необходимо для планирования деятельности завода на ближайшее время, чтобы не возникло ситуации выхода за рамки квоты энергии заводом за достаточно большое количество времени до конца расчётного периода: остановка завода невозможна, а заказ дополнительной энергии повлечёт дополнительные незапланированные финансовые потери. Вопрос потребления электроэнергии на НПЗ и рассматривается в данной работе [5].

### Постановка задачи

Пусть имеется модель нефтеперерабатывающего завода, на котором производится разгонка нефти на некоторое число компонент  $K$ . Завод состоит из множества установок в количестве  $N$ , и с целью упрощения модели будем считать их идентичными. Каждая установка может работать на нескольких скоростных и температурных режимах  $M$ , при этом вырабатывается различное, но заранее известное, количество каждой компоненты, получаемое в единицу времени  $c_{mk}$ . Также будем считать известной мощность  $w_m$ , потребляемую каждой установкой на отдельном, дискретном, режиме  $m$ . Пусть также завод должен поставлять необходимое число компонент своим заказчикам либо на следующий этап работы завода (смещение) к определённым срокам —  $q_{kt}$  — в конце временного промежутка  $t$ . При переключении режимов на установках меняются скорости получения компонент, поэтому этим фактом можно воспользоваться, чтобы получить необходимый результат. При этом недопустимо переполнение резервуаров ограниченной ёмкости  $v_k$ , куда поступают производимые компоненты, из-за чего выбор режимов не может являться абсолютно произвольным. Более того, частое переключение режимов также не рекомендуется, пото-

му что переключение режимов может приводить к дополнительным затратам из-за нестационарности процесса.

В этой работе задачей является нахождение наиболее разумного как с точки зрения энергетической эффективности, так и с точки зрения качества получаемых продуктов, плана работы завода в рамках вышеописанного процесса работы. Планом будет являться последовательность режимов, на которых должны работать установки, и длительности их работы на каждом из режимов.

### Решение задачи

Для получения такого плана задача была разбита на две подзадачи. В первой подзадаче сначала считаем, что установки работают равные отрезки времени между переключениями режимов, то есть произведена дискретизация планируемого времени на равные интервалы. Исходя из этих данных, с использованием разработанного алгоритма можно найти последовательность режимов, на которые стоит переключать установки. Был разработан алгоритм, относящийся к классу генетических алгоритмов [2], который эволюционно, шаг за шагом, позволяет получить оптимальное решение задачи или подойти к нему достаточно близко. При постоянной длительности временных интервалов  $\Delta$  общее потребление электроэнергии равно:

$$W = \Delta \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_m b_{mt}^n \quad (1)$$

где  $b_{mt}^n$  – трёхмерная двоичная матрица, элемент  $b_{mt}^n$  которой равен единице, если установка  $n$  работает на режиме  $m$  на промежутке времени  $t$ , и равен нулю в противном случае. Стоит отметить, что при этом

$\sum_{m=1}^M b_{mt}^n = 1, \forall t = 1..T, \forall n = 1..N$ . Запишем общий объём компоненты  $k$ , произведённой за интервал времени  $t$ :

$$z_{kt} = \Delta \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M c_{mk} b_{mt}^n \quad (2)$$

Пусть в конце интервала времени  $t$  требуется получить  $q_{kt}$  компоненты  $k$ . Тогда можно записать условие удовлетворения спроса:

$$\sum_{t=1}^{\tau} (z_{kt} - q_{kt}) \geq 0, \forall k = 1..K, \forall \tau = 1..T \quad (3)$$

Установим ограничения на ёмкости резервуаров. Если объём  $k$ -го резервуара равен  $v_k$ , то ограничением на конец промежутка времени  $t$  будет:

$$\sum_{t=1}^{\tau-1} (z_{kt} - q_{kt}) + z_{kt} \leq v_k, \forall k = 1..K, \forall t = 1..T \quad (4)$$

Минимизируемым функционалом является  $W$ , искомыми переменными – величины  $b_{mt}^n$ . Эта задача решена с помощью специально разработанного варианта генетического алгоритма. Выбор именно класса генетических алгоритмов обусловлен, во-первых, тем, что данная модель не является линейной, по-

этому к ней неприменимы методы решения задач линейного программирования, и, во-вторых, тем, что генетические алгоритмы возможно легко распределять между вычислительными устройствами и рассчитывать решение параллельно, что может значительно ускорить получение ответа.

Для решения задачи вводится матрица-ген  $\beta_t^n$ , определяемая через  $b_{mt}^n$  однозначно следующим образом:  $\beta_t^n = m$ , если  $b_{mt}^n = 1$ . Функционал  $W$ , таким образом, назовём функцией приспособленности фенотипа (гена). Для ввода ограничений на объёмы резервуаров и на требования клиентов применяем метод штрафных функций [4]:

$$W^* = W + \sum_i W^i = W + \sum_i h(l^i(\beta), r^i(\beta)) \quad (5)$$

где  $W$  — ранее введённая функция,  $h(f, g) = (f - g) \cdot \theta(f - g) + C$ , где  $\theta(x)$  — функция Хевисайда ( $\theta(f) = 1, f \geq 0$  и  $\theta(f) = 0, f < 0$ ),  $C = \text{const}$ , а каждое ограничение записано в виде  $l^i(\beta) \leq r^i(\beta)$ . Вводим начальную популяцию в виде случайного набора генов и производим новые поколения следующим образом:

1. Добавим некоторое количество  $R$  случайных генотипов в текущую популяцию.

2. Проведём репродукцию новых особей. Отметим, что при репродукции не будем избавляться от родительских генотипов и оставим их в текущем поколении:

(а) Выполняем между случайными парами особей кроссинговер (обмен случайными подпоследовательностями генов);

(б) Для некоторых особей, выбранных также случайным образом, проводим мутацию («переворачивание» какой-либо случайной подпоследовательности генов);

3. Произведём селекцию особей – выберем  $P$  наиболее приспособленных особей, а остальных уничтожим.

При достаточно большом числе итераций будет, очевидно, происходить улучшение особей, и в итоге можно получить удовлетворительный результат. Нет гарантий, что он будет оптимален, однако же этот метод позволяет находить результат при ограниченном времени и в любое время остановить процесс. При вводе критерия качества результата можно останавливать процесс по достижении его удовлетворения. Для улучшения решения предлагается ввести вторую часть задачи. Пусть известно решение первой части — режимы, на которых должны работать установки. Будем считать теперь промежутки времени  $\Delta_t$  переменными. Перепишем задачу с учётом этого факта. Пусть  $\zeta_{kt}$  — суммарное производимое количество компоненты  $k$  на интервале  $t$  в единицу времени,  $z_{kt} = \zeta_{kt} \Delta_t$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \sum_t \omega_t \Delta_t \rightarrow \min \\ \sum_{t=1}^{\tau} \Delta_t \leq \tau \cdot \Delta, \forall \tau = 1..T \\ \sum_{\tau=1}^T \Delta_{\tau} \geq T \cdot \Delta \\ \sum_{t=1}^{\tau} \zeta_{kt} \Delta_t \leq v_k + \sum_{t=1}^{\tau-1} q_{kt}, \forall k = 1..K, \forall \tau = 1..T \\ \sum_{t=1}^{\tau} (\zeta_{kt} \Delta_t - q_{kt}) \geq 0, \forall k = 1..K, \forall \tau = 1..T \\ \zeta_{kt} = \sum_n \sum_m c_{mk} b_{mt}^n \end{array} \right. \quad (6)$$

В этом случае  $\Delta_t$  будут искомыми переменными. Тогда задача является задачей линейного программирования и решается при помощи симплекс-метода [3, 4]. Для связи решений двух подзадач полученные в первой части значения – номера используемых режимов – просто переносятся как известные данные во вторую часть.

### Заключение

В итоге были получены следующие результаты:

- разработана упрощённая модель НПЗ с одинаковыми установками с возможностью требования выполнения заказов к определённым срокам;
- разработан метод построения расписания работы установок, являющийся комбинацией генетического алгоритма и симплекс-метода.

Таким образом, задачи, поставленные к выполнению в данной работе, были решены в полной мере.

### Список литературы

1. Голомшток Л.И., Халдей К.З. Снижение потребления энергии в процессах переработки нефти. — М.: Химия, 1990.
2. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. — М.: Финансы и статистика, 2002.
3. Половинкин Е.С., Балашов М.В. Элементы выпуклого и сильно выпуклого анализа. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
4. Умнов А.Е. Введение в методологию математического моделирования: Учеб. пособие. — М.: МФТИ, 2009.
5. Zhenya Jia, Marianthi Ierapetritou. Refinery Short-Term Scheduling using Continuous Time Formulation — Crude Oil Operations. — Honeywell Hi-Spec Solutions.

## **ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ФИНАНСОВЫМ УЩЕРБОМ ОТ ОТКАЗОВ КОМПОНЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **Аннотация**

В данной работе поднимается актуальная проблема определения и управления финансовым ущербом организации вследствие отказов компонентов сложных технических систем, используемых организацией в рамках собственных производственных и бизнес-процессов. Описывается авторская методика определения величины ущерба на основе измеримых и нормативно-справочных величин, использующая сервис-ориентированный подход к анализу структуры и функций технической системы.

### **Введение**

В современном мире неотъемлемой составляющей производственных и бизнес-процессов каждой организации являются сложные технические системы, содержащие в своем составе аппаратные и программные компоненты. Это различные технологические комплексы, системы управления производством, информационные системы, вычислительные и телекоммуникационные сети. От бесперебойного функционирования данных систем зависит возможность ведения и прибыльность бизнеса организации. Отказы компонентов систем приводят к прерываниям и нарушениям производственных и бизнес-процессов организации, а, следовательно, к финансовому ущербу организации.

Для решения задачи идентификации и управления финансовыми последствиями нежелательных событий в различных сферах деятельности человека широко применяется анализ и управление рисками. Значение риска представляет собой комбинацию вероятности наступления рискованного события и результирующего ущерба и является мерой критичности события.

Любой подход к управлению рисками независимо от области применения сводится к двум основным направлениям деятельности: оценке риска и принятию адекватных решений по обработке рисков [1].

Выделяют четыре основных способа обработки рисков:

- принятие риска как допустимого;
- уменьшение риска посредством реализации комплекса подходящих контрмер;
- передача риска частично или полностью сторонней организации;
- отказ от вызывающих риск процессов, технологий и т.д.

Способ обработки риска и реализация данного способа в конкретной ситуации определяется на основании результатов этапа оценки рисков – значений неприемлемых рисков.

Значения риска  $R$  рассчитывается как произведение вероятности рисковог-го события  $P$  и результирующего ущерба  $L$ , которые определяются с помощью различных методов анализа риска:

$$R = P \cdot L.$$

Говоря о рисках отказах технических систем, стоит отметить, что методы определения вероятности отказов компонентов таких систем достаточно хорошо проработаны, в то время как универсальных способов определения ущерба от отказов нет.

В большинстве случаев для определения значения ущерба используют экспертный анализ, когда экспертам предлагается оценить ущерб от рисковог-го события, в данном случае – отказа, по балльной шкале либо напрямую в денеж-ных единицах. Оценка по балльной шкале для финансового ущерба слабо ин-формативна и требует калибровки шкалы в денежных единицах. Достоверность результатов будет очень сильно зависеть о правильности калибровки. Оценить ущерб от отказа напрямую крайне сложно.

Требуется некоторая методика расчета ущерба от отказов в денежном эк-виваленте, которая могла бы использоваться при анализе рисков для расчета значений ущерба напрямую или как вспомогательный инструмент оценивания ущерба для экспертов.

### **Методика расчета ущерба от отказов компонентов сложных техниче-ских систем**

Методика расчета ущерба должна учитывать следующую важную осо-бенность ущерба от отказов компонентов технических систем: данный ущерб определяется двумя факторами. Это:

- убытки, связанные с восстановлением и/или заменой компонента;
- убытки, связанные с прерыванием производственных и бизнес-процессов организации.

Последние в общем случае не связаны напрямую с отказами конкретных технических компонентов: отказ некоторог-го компонента, может, например, во-обще не повлиять на ход производственного процесса, если данный компонент в нем не участвует, или функция компонента в процессе после отказа была взя-та на себя другим компонентом.

Для того чтобы связать работу конкретных технических компонентов с производственными и бизнес-процессами организации, вводится понятие сер-вис.

Сервис – функция системы, которую конечный потребитель (пользо-ватель) использует для выполнения некоторой служебной цели или для получе-ния оплачиваемых услуг.

В качестве пользователей предлагается рассматривать сотрудников и клиентов организации.

С учетом вышесказанного определение ущерба от отказов компонентов предлагается проводить следующим образом (предполагается, что разбиение системы на компоненты  $i$  уже проведено).

1. Определить стоимость восстановления компонента системы  $Lr(i)$  на основе справочных величин и предшествующего опыта.

2. Провести описание пользователей системы  $u$  с указанием стоимости простоя пользователя-сотрудника  $Ch(u)$  в ден.ед./ч, первичное выделение сервисов  $srv$ .

3. Выявить и описать потребности пользователей в сервисах системы  $DSrv(u, srv)$  Для пользователей сотрудников выражается в проценте рабочего времени сотрудника, посвященного работе с сервисом.

4. Выявить способы реализации сервиса для совокупностей пользователей на основании  $DSrv(u, srv)$ :  $ISrv(srv, (u_\gamma, \dots, u_\delta)) = \{si(i_\alpha, \dots, i_\beta) | si(i_\alpha, \dots, i_\beta) \in \{si_1, \dots, si_{n_{si}}\}\}$ , где  $si(i_\alpha, \dots, i_\beta)$  - некоторая совокупность компонентов системы;

5. Зафиксировать группы пользователей  $UG$  в зависимости от способов реализации сервисов  $ISrv(srv, (u_\gamma, \dots, u_\delta))$ :

$$UG = \{UG_1, \dots, UG_{nug}\} = \{(u_\gamma, \dots, u_\delta) | ISrv(srv, (u_\gamma, \dots, u_\delta)) \in \{ISrv_1, \dots, ISrv_{n_{is}}\}\};$$

6. Выявить критические способы реализации сервиса  $CISrv(srv, UG) \in \{CISrv_1, \dots, CISrv_{n_{cis}}\}$  на основании  $ISrv(srv, UG)$  для каждой выделенной  $UG$ . Под критическим способом реализации сервиса понимается совокупность компонентов системы, одновременных отказ которых приводит к недоступности сервиса для определенной группы пользователей.

7. Зафиксировать необходимые данные:  $i, t, u, UG, srv, DSrv(u, srv), CISrv(srv, UG)$ , критические совокупностей компонентов  $si \in \{si_1, \dots, si_{n_{msi}}\}$ , соответствующих критическим способам реализации сервиса:

$$si = \{si(i_\alpha, \dots, i_\beta) | si(i_\alpha, \dots, i_\beta) = CISrv(srv, UG) \in \{CISrv_1, \dots, CISrv_{n_{cis}}\}\}.$$

8. Определить ущерб от недоступности сервиса для внешних пользователей  $Lwch(srv, UG)$  в ден.ед./ч. соответствует сумме штрафа за неоказание услуг и/или размеру неполученного дохода.

9. Определить ожидаемое время недоступности сервиса для каждой пары сервис – критический способ реализации сервиса ( $srv, CISrv$ ):

$$T_{SR}(CISrv) = \min_i (MTTR(i)), i \in CISrv(srv, UG) = si(i_\varepsilon, \dots, i_\phi),$$

где  $MTTR(i)$  – среднее время восстановления компонента  $i$  (справочная величина, может рассчитываться на основании статистических данных об отказах компонента).

10. Рассчитать значения ущерба от недоступности сервиса в течение 1 часа  $Lwh(srv, UG)$ :

$$Lwh(srv, UG) = \sum_{\mu} 0,01 DSrv(u, srv) \cdot Ch(u) + Lwch(srv, UG),$$

где  $\mu$  – число пользователей-сотрудников из группы  $UG$ , использующих в работе сервис  $srv$ ;

11. Рассчитать значения ущерба от отказа критической совокупности

$$Lw( si ) = T_{SR}( CISrv ) \cdot \sum_{\alpha, \beta} Lwh( srv_{\alpha}, UG_{\beta} ),$$

где  $(srv_{\alpha}, UG_{\beta}) \in \{(srv, UG) | CISrv(srv, UG) = si\}$ ;

$Lw(i) = Lw(si)$ , где  $si = i$ .

12. Расчет значения общего ущерба в результате отказа

$$L(i) = Lr(i) + Lw(i), \quad L(si) = Lw(si).$$

Данная методика расчета значения ущерба от отказов рекомендуется для определения ущерба в рамках анализа рисков отказов по методу, описанному в работе [2]. Апробация указанного метода в совокупности с описанной методикой расчета ущерба от отказов проводилась в рамках исследования конфигураций ядра вычислительной сети Московского энергетического института. Исследование проводилось в 2011-2012 гг. совместно с Информационно-вычислительным центром Московского энергетического института. Результаты исследования представлены в работе [3]. В ходе исследования был сделан вывод о том, методика, предложенная для оценки ущерба, удобна для работы, результаты ее использования отражают действительную ситуацию по возможному ущербу от отказов компонентов сложной технической системы.

### **Заключение**

В данном докладе были сформулированы проблемы, с которыми сталкиваются организации в рамках решения задачи идентификации и управления финансовым ущербом от отказов компонентов используемых сложных технических систем. Представлена разработанная автором методика расчета ущерба от отказов компонентов на основе измеримых и справочных величин. Методика позволяет учитывать ущерб от прерывания производственных процессов организации и рекомендуется к использованию в рамках анализа и управления рисками отказов компонентов сложных технических систем.

### **Список литературы**

1. Астахов А.М. Искусство управления информационными рисками. – М.: ДМК Пресс, 2010.
2. Васильева Т.Н., Бородюк В.П., Крепков И.М. Минимизация расходов, возникающих вследствие отказов корпоративной информационно-вычислительной системы // Вестник МЭИ. - №2 – 2012.
3. Васильева Т.Н., Крепков И.М., Хорьков С.Н. Экономическая эффективность перехода к системам виртуализации с точки зрения доступности сервисов корпоративной сети // Новые информационные технологии и менеджмент качества (NIT&QM'2012). Доклады международной научной конференции. – М.: ООО «Арт-Флэш», 2012.

## ИНТЕРВАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ИНЕРЦИОННОГО ТРАНСФОРМАТОРА ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА

### Аннотация

В работе рассмотрена интервальная модель инерционного трансформатора вращающего момента (ИТВМ), представляющая собой составные системы дифференциальных уравнений, а также алгоритм ее решения, основанный на численном методе Рунге-Кутты.

### Введение

Моделями многих сложных технических объектов являются системы дифференциальных уравнений. В общем случае получить точное аналитическое решение таких систем невозможно. Поэтому основными способами оценивания решения являются приближенные численные методы. Одним из наиболее распространенных на практике является семейство методов Рунге-Кутты. Учитывая то, что ряд измеряемых параметров моделей определяется с погрешностями, и численный алгоритм решения систем дифференциальных уравнений тоже накладывает свою ошибку, получаемая оценка решения может сильно отличаться от истинного. В этом случае хорошим способом могут выступать интервальные оценки решения, задаваемые нижней и верхней границей [1]. Точность получаемых решений может сильно влиять на алгоритмы управления такими системами.

### Постановка задачи

Рассматривается модель рабочего процесса ИТВМ. Работа ИТВМ имеет циклический характер. В течение цикла выделяются четыре участка, на которых дифференциальные уравнения движения не меняются: 1) разгон реактора до угловой скорости ведомого маховика; 2) совместное движение реактора и ведомого маховика; 3) торможения реактора до остановки; 4) выстой реактора [2].

Система уравнений, описывающая первый участок

$$\begin{cases} B_1(\psi)\ddot{\phi}_{21} + B_2(\psi)\ddot{\phi}_{22} - B_4(\psi)(\dot{\phi}_{21} - \dot{\phi}_{22})^2 + B_6(\psi)\dot{\phi}_{22}^2 = M_D; \\ B_2(\psi)\ddot{\phi}_{21} + B_3\ddot{\phi}_{22} - B_6(\psi)\dot{\phi}_{21}^2 = 0; \\ J_{II}\ddot{\phi}_1 = -M_C. \end{cases} \quad (1)$$

Переход на второй участок происходит, когда угловая скорость реактора достигает угловой скорости ведомого звена, т.е.  $\dot{\phi}_1(t_1) = \dot{\phi}_{22}(t_1)$ .

На втором участке система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} B_1(\psi)\ddot{\varphi}_{21} + B_2(\psi)\ddot{\varphi}_{22} - B_4(\psi)(\dot{\varphi}_{21} - \dot{\varphi}_{22})^2 + B_6(\psi)\dot{\varphi}_{22}^2 = M_D; \\ B_2(\psi)\ddot{\varphi}_{21} + B_5\ddot{\varphi}_{22} - B_6(\psi)\dot{\varphi}_{21}^2 = -M_C. \end{cases} \quad (2)$$

Условием перехода является поворот сателлита в относительном движении на  $\pi$  радиан, т.е.  $\varphi_{21}(t_2) - \varphi_{22}(t_2) = \frac{\pi}{a}$ .

Третий участок имеет такие же уравнения, что и первый (1). При достижении реактором угловой скорости равной нулю система переходит на четвертый участок работы, т.е.  $\dot{\varphi}_{22}(t_3) = 0$ .

Четвертый участок описывается следующими уравнениями

$$\begin{cases} B_1(\psi)\ddot{\varphi}_{21} - B_4\dot{\varphi}_{21}^2 = M_D; \\ J_{II}\ddot{\varphi}_1 = -M_C. \end{cases} \quad (3)$$

где  $\varphi_i, \dot{\varphi}_i$  – обобщенные координаты и обобщенные скорости,

$$B_1(\psi) = J_{21} + nme^2 + 2nmed(1+a)\cos\psi + nJ_{\Gamma}(1+a)^2,$$

$$B_2(\psi) = -anJ_{\Gamma}(1+a) - nmaed\cos\psi, \quad B_3 = J_{22} + nJ_{\Gamma}a^2,$$

$$B_4(\psi) = nmaed(1+a)\sin\psi, \quad B_5 = B_3 + J_{II},$$

$$B_6(\psi) = nmaed\sin\psi, \quad \psi(t) = a(\varphi_{21} - \varphi_{22}),$$

$a$  – внутреннее передаточное отношение;  $n$  – число грузовых звеньев;  $m$  – масса грузового звена;  $d$  – расстояние от оси вращения грузового звена до его центра тяжести;  $e$  – расстояние от оси вращения ИТВМ до оси вращения грузового звена;  $J_{21}$  – приведенный момент инерции ведущих элементов;  $J_{22}$  – приведенный момент инерции ведомой части реактора;  $J_{II}$  – приведенный момент инерции ведомых элементов;  $J_{\Gamma}$  – приведенный момент инерции грузового звена,  $M_D$  – момент двигателя,  $M_C$  – момент сопротивления. Начальные условия для первого участка  $\varphi_{21}(0) = \varphi_{210}$ ,  $\dot{\varphi}_{21}(0) = \dot{\varphi}_{210}$ ,  $\varphi_{22}(0) = \varphi_{220}$ ,  $\dot{\varphi}_{22}(0) = \dot{\varphi}_{220}$ ,  $\varphi_1(0) = \varphi_{10}$ ,  $\dot{\varphi}_1(0) = \dot{\varphi}_{10}$ . В качестве начальных значений для последующих участков используются конечные значения предыдущих участков, что вытекает из непрерывности процесса.

Ряд параметров модели измеряются с погрешностями, то есть их истинные значения лежат в интервалах, определяемых погрешностями средств измерений. В частности, оценками истинных значений моментов двигателя и сопротивления являются интервалы  $[M_D - \varepsilon_1, M_D + \varepsilon_1]$  и  $[M_C - \varepsilon_2, M_C + \varepsilon_2]$ . Подставляя эти интервалы в модель (1)-(3), получаем интервальную модель рабочего процесса ИТВМ. Решением такой модели тоже будут являться интервалы  $[\underline{\varphi}_i, \overline{\varphi}_i]$ .

Задача ставится следующим образом – решить системы дифференциальных уравнений (1)-(3) с интервальными параметрами при заданных начальных условиях.

### Алгоритм решения

Рассмотрим метод решения поставленной задачи на примере системы уравнений (1). На данный момент разработаны различные алгоритмы решения интервальных дифференциальных уравнений. В работе [3] представлены интервальные методы Рунге-Кутты. При решении поставленной задачи надо учесть ее особенности. Аргументом функций есть время, которое не является интервальной величиной. Интервальными являются лишь часть параметров. Рассмотрим алгоритм, основанный на апостериорной оценке погрешности [4]. Выделим основные шаги алгоритма применительно к системе (1).

1. Решаем систему (1) методом Рунге-Кутты четвертого порядка при конкретных значениях параметров  $M_D$  и  $M_C$  на равномерной сетке  $\omega_h$ . Для решения преобразуем систему (1) к нормальному виду

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{21} = \chi; \\ \dot{\chi} = \frac{B_6(\psi)(B_3\xi^2 + B_2(\psi)\chi^2) - B_3B_4(\psi)(\chi - \xi)^2 - B_3M_D}{B_2^2(\psi) - B_1(\psi)B_3}; \\ \dot{\phi}_{22} = \xi; \\ \dot{\xi} = \frac{B_2(\psi)B_4(\psi)(\chi - \xi)^2 - B_6(\psi)(B_2(\psi)\xi^2 + B_1(\psi)\chi^2) + B_2(\psi)M_D}{B_2^2(\psi) - B_1(\psi)B_3}; \\ \dot{\phi}_1 = \zeta; \\ \dot{\zeta} = -\frac{M_C}{J_D}. \end{cases} \quad (4)$$

2. Через полученные значения функций  $\phi_{21}$ ,  $\phi_{22}$ ,  $\phi_1$ ,  $\chi$ ,  $\xi$ ,  $\zeta$  в узлах сетки  $\omega_h$  и их производные, вычисленные приближенно по системам уравнений (4), строятся эрмитовы сплайны третьей степени  $s_i$ . Определяем функции  $\phi_i(t, s) = f_i(t, s) - \frac{ds_i}{dt}$ , где  $f_i(t, s)$  – функции правой части уравнений (4).

3. Строятся и численно решаются две системы дифференциальных уравнений  $\frac{du}{dt} = Wu + w$ ,  $u(0) = 0$ ;  $\frac{dv}{dt} = Wv$ ,  $v(0) = 0$ ,

где  $w$  – единичный вектор, а элементы матрицы  $W$  определяются следующим

образом:  $W_{ii} = \frac{\partial f_i}{\partial y_i}(t, s)$  и  $W_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial y_j}(t, s) \right|_{i \neq j}$ .

Для системы уравнений (4) матрица  $W$  будет иметь следующий вид

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ W_{41} & W_{42} & W_{43} & W_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

4. Строятся эрмитовы сплайны  $s_i^{(1)}$  и  $s_i^{(2)}$  для полученных на третьем шаге решений  $u$  и  $v$  на сетке  $\omega_h$ . Решение системы (1) с интервальными параметрами записывается в виде  $y_i = s_i + [-1;1]s_i^{(2)} + as_i^{(1)}$ , где  $a$  – некоторая интервальная константа.

5. На последнем шаге определяется значение константы  $a$ . Для этого вводятся интервальные функции  $\frac{\partial f_i}{\partial y_i}(t, \theta) \in f_{y,i,j}(t, [\underline{\theta}; \bar{\theta}]) = [\underline{f}_{y,i,j}; \bar{f}_{y,i,j}]$  путем интервального расширения. Используется центрированное дифференциальное расширение [1]. Задаем интегральную функцию  $[\underline{\phi}_i; \bar{\phi}_i] = f_i(t, s) - \frac{ds_i}{dt}$ .

Используя некоторые константы  $\delta_i$ , определяются величины  $r_i = s_i + [-1;1]s_i^{(2)} + [-\delta_i; \delta_i]s_i^{(1)}$ . Далее определяются величины

$$\tilde{f}_{y,i,j}(t) = \max(|\underline{f}_{y,i,j}(t, r)|, |\bar{f}_{y,i,j}(t, r)|), \quad \Phi_i(t) = \max(|\underline{\phi}_i(t, s)|, |\bar{\phi}_i(t, s)|) - \\ - ds_i^{(2)}(t)/dt + \sum_{j=1}^m \tilde{f}_{y,i,j}(t)s_i^{(2)}(t), \quad \Psi_i(t) = ds_i^{(1)}(t)/dt - \sum_{j=1}^m \tilde{f}_{y,i,j}(t)s_i^{(1)}(t).$$

Значение величины  $a$  определяется по формуле  $a = \max_{i=1, \dots, m} (\Phi_i(t)/\Psi_i(t), 0)$ .

### Заключение

Рассмотренный алгоритм позволяет получить решение для интервальной модели рабочего процесса ИТВМ. Недостатком является вычислительная сложность алгоритма, приводящая к большим временным затратам получения решения. Ускорение получения решения возможно за счет использования переменной сетки интегрирования и распараллеливания вычислений для каждого из этапов рабочего процесса, описываемого системами (1)-(3).

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-07-00580-а.

### Список литературы

1. Шарый, С.П. Конечномерный интервальный анализ. – Институт вычислительных технологий СО РАН. – 2012. – 603 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nsc.ru/interval> (дата обращения 12.12.2012).
2. Баженов, С.П. Бесступенчатые передачи тяговых и транспортных машин [Текст]: учеб. Пособие / С.П. Баженов. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2003. – 81 с.
3. Шокин, Ю.И. Интервальный анализ / Ю.И. Шокин. – Новосибирск: Наука, 1981. – 112 с.
4. Добронев, Б.С. Интервальная математика: Учеб. пособие / Б.С. Добронев. – Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 2004. – 216 с.

## **ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТОВ В НЕОБСАЖЕННЫХ СКВАЖИНАХ**

### **Аннотация**

В статье рассматриваются общие вопросы управления техническими комплексами для испытания продуктивных пластов в необсаженных скважинах. Приводятся схема коммутации скважинного оборудования с блоком управления, блоком питания и регистратором через геофизический кабель, фрагмент данных, полученных при определении свойств пласта.

### **Актуальность**

В общих затратах времени на строительство скважины этап, связанный с испытанием и исследованием, в эксплуатационном бурении занимает более 40 %, а в разведочном – более 22 %. Это связано не только с недостатками в организации и технологии работ, но и с отсутствием достоверных данных о продуктивности испытываемых пластов [4].

В последние годы при испытании пластов особое внимание уделяется разработке оперативных методов и средств изучения гидродинамических характеристик коллекторов (проницаемости, гидропроводности, пластового давления, коэффициента продуктивности и т.д.) в условиях необсаженной скважины. Наиболее экономичными и производительными являются технические комплексы, использующие каротажное оборудование и кабель для гидродинамического воздействия на продуктивный пласт [2, 3].

При усовершенствовании и разработке нового оборудования для испытания пластов на кабеле в настоящее время отмечается тенденция ужесточения требований к точности позиционирования аппаратуры в скважине, достоверности получаемых результатов, надежности и производительности аппаратуры, что достигается за счет согласованной и взаимосвязанной работы скважинного оборудования и наземных модулей управления этим оборудованием.

### **Материалы и методы исследования**

Управление скважинным оборудованием для испытания пластов в необсаженных скважинах осуществляются с помощью следующих модулей и блоков управления:

- модуля гамма-каротажа и силовой электроники;
- модуля телеметрии;
- блока управления;
- блока питания;
- регистратора.

Модуль гамма-каротажа (ГК) позволяет осуществлять привязку прибора по глубине опускания в скважине. В состав модуля входят кристаллы типа «натрий-йод» с повышенной чувствительностью рентгеновского излучения. Силовая электроника, встроенная в модуль ГК, предназначена для управления гидравлическими клапанами и насосной станцией прибора (рис. 1).



Рис. 1. Модуль ГК



Рис. 2. Модуль телеметрии

Модуль телеметрии предназначен для получения информации о фазовом составе и параметрах отбираемой пластовой жидкости (давление, температура) с последующим преобразованием данных в код Манчестер II и его посылкой по стандартному геофизическому кабелю в режиме реального времени к наземному регистратору (рис. 2).

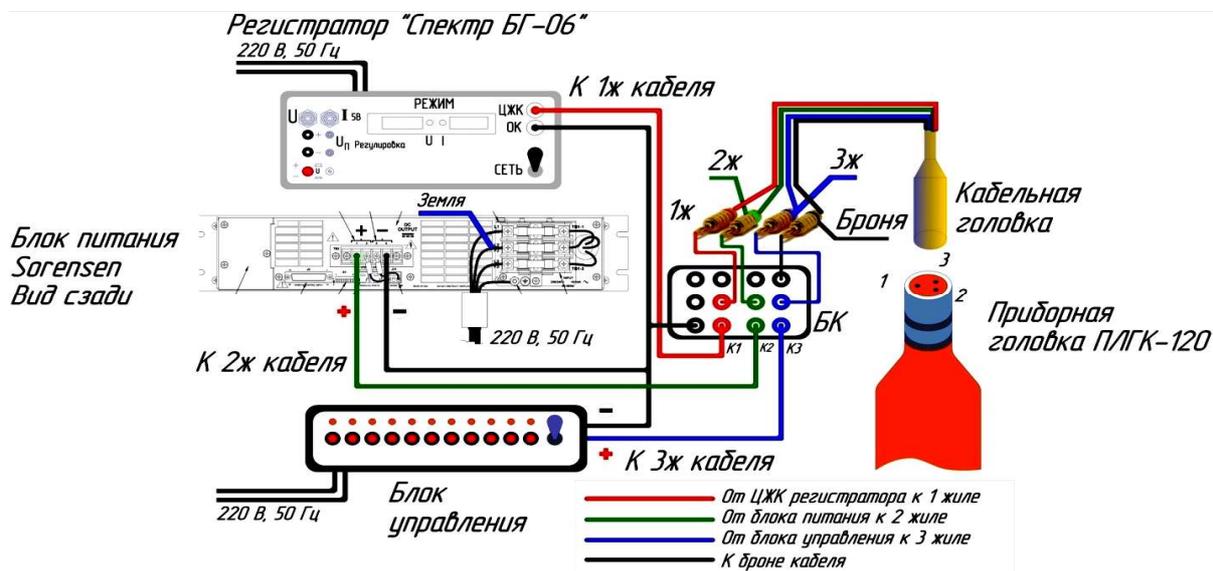


Рис. 3. Схема коммутации скважинного оборудования с блоком управления, блоком питания и регистратором через геофизический кабель

Блок управления осуществляет управление скважинным оборудованием через геофизический кабель. Кодированный сигнал поступает по третьей жиле геофизического кабеля на центральный процессор силовой электроники (рис. 3). При отработке гидравлического распределителя или электродвигателя центральный процессор выдает сигнал о состоянии прибора, который

отображается на мониторе оператора. Таким образом, при нажатии любой кнопки на блоке управления оператор может следить за работой прибора по его состоянию (рис. 4, рис. 5).

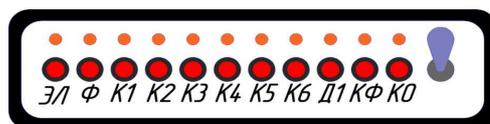


Рис. 4. Панель блока управления

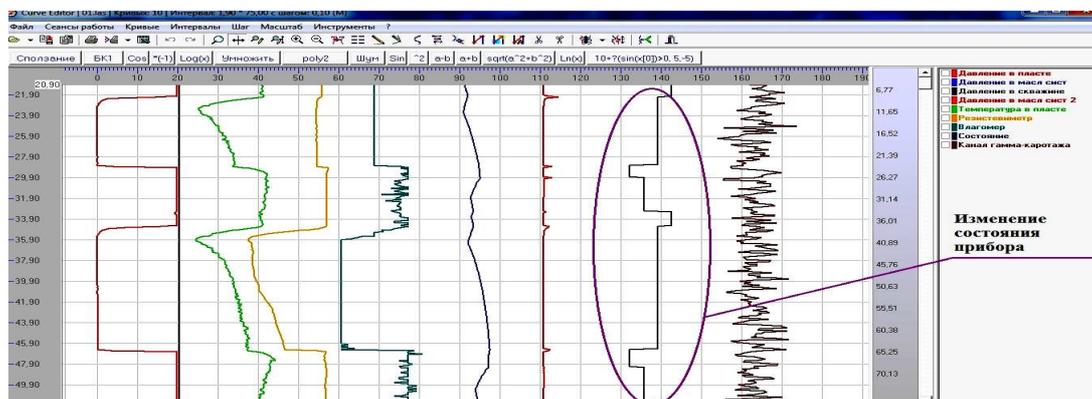


Рис. 5. Фрагмент программы оператора

Для исключения влияния силовой электрики на управление и телеметрию необходимо их разделить по разным жилам геофизического кабеля – телеметрия по первой жиле, питание прибора (напряжение 220 В и ток 2 А) по второй жиле, управление по третьей жиле. Управление не работает при выключенном регистраторе.

Питание прибора осуществляется с помощью импульсного блока питания *Sorensen DLM 600-5E* (рис. 6).

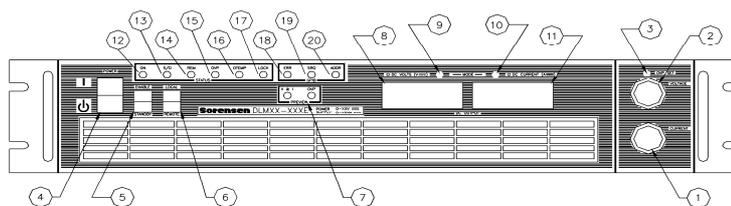


Рис. 6. Блок питания (лицевая панель)

Регулирование выходного напряжения постоянного тока и величина силы тока регулируются винтами 1 и 2. Преимущество применения такого блока питания заключается в точной регулировке электрической мощности, в защите от короткого замыкания и в удобном программировании его работы.

### Результаты исследования и их обсуждение

Информация о гидростатическом давлении в скважине, давлении пластовой жидкости, температуре пластовой жидкости и фазовом составе пластовой жидкости, полученная с помощью глубинного модуля телеметрии, выводится в виде диаграмм (рис. 7) [1].

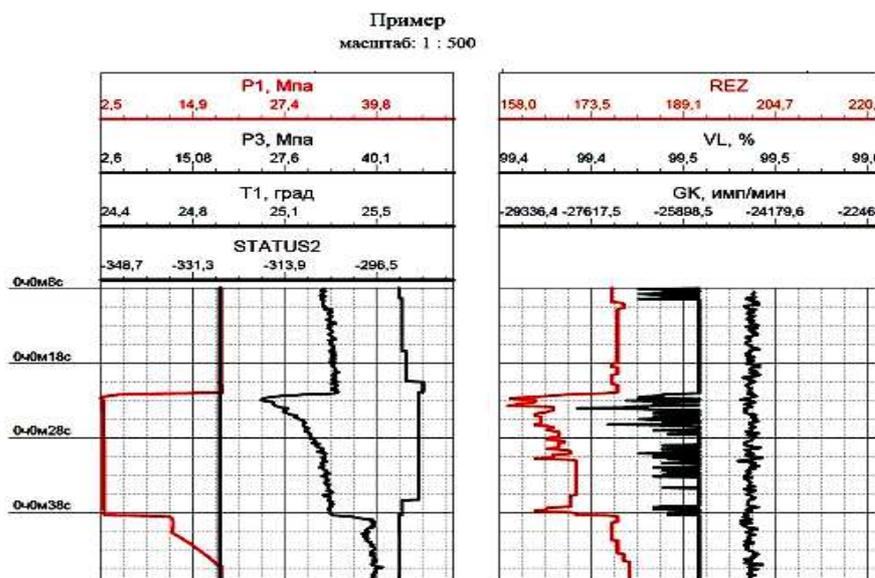


Рис. 7. Фрагмент данных, полученных при определении свойств пласта

Кривые восстановления давления интерпретируются в программе *Karra Ecrin Saphir* с использованием математической модели полусферического притока. В результате, в точках гидродинамического каротажа определяются проницаемость, анизотропия проницаемости и скин-фактор.

### Выводы и выражение благодарности

При проведении работ по испытанию продуктивных пластов в необсаженных скважинах необходимо обеспечить достоверность и высокое качество работ, что достигается за счет слаженной работы скважинного оборудования и модулей с блоками управления этим оборудованием.

Коллектив авторов выражает благодарность ООО НПП «Керн» за помощь при подготовке материалов статьи.

### Список литературы

1. Инновационная разработка – гидравлический пластоиспытатель на трехжильном геофизическом кабеле / Хисматуллин К. А., Исламова Е. Р., Галлямов Ш. Р., Муфазалов Э. М., Хакимов Р. В. // Научно-технический вестник «Каротажник». 2012. № 12 (222). С. 91 – 102.

2. Пат. 2371577 Российская Федерация, МПК7 Е 21 В 49/08. Пробоотборник пластового флюида / Галлямов Ш. Р., Месропян А. В., Зайтова А. Р.; патентообладатель ООО «Керн». – № 2008110946/03; заявл. 24.03.2008; опубл. 27.10.2009.

3. Пат. 2465457 Российская Федерация, МПК7 Е 21 В 49/08. Пробоотборник пластового флюида / Галлямов Ш. Р., Месропян А. В.; патентообладатель ООО НПП «Керн». – № 2011115965/03; заявл. 21.04.2011; опубл. 27.10.2012, бюл. 30.

4. Практическое руководство по испытанию скважин: монография / В. К. Федорцов, Г. М. Терешенков. – Тюмень: Сиб. науч.-аналит. центр, 2007. – 133 с.

## УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ НИСХОДЯЩЕГО КАНАЛА В OFDMA БЕСПРОВОДНЫХ СОТОВЫХ СЕТЯХ

### Аннотация

Рассматривается задача управления мощностью нисходящего канала в сотовых сетях, заключающаяся в оптимальном выборе мощности ресурсных блоков базовой станции. Для решения данной невыпуклой задачи оптимизации предложен эффективный метод, основанный на решении серии выпуклых задач методом переменных направлений.

### Введение

С каждым годом растет объем передаваемых данных в беспроводных сотовых сетях, поэтому, несомненно, актуальна задача увеличения пропускной способности сети, основным ограничителем для которой является интерференция. В сетях OFDMA (*orthogonal frequency-division multiple access*) интерференция внутри одной соты исключается за счет частотного разделения каналов, и основная борьба идет за уменьшение интерференции между соседними сотами. Этого можно добиться, используя механизмы распределения частотных ресурсов (ресурсных блоков) и управления мощностью ресурсных блоков базовой станции соты.

Задача управления мощностью является сложной невыпуклой оптимизационной задачей. В [4, 5] используется двойственный метод декомпозиции, чтобы разбить сложную задачу на подзадачи меньшей размерности. Для поиска двойственных переменных в [5] используется субградиентный метод. В [4] вместо невыпуклой задачи решается серия выпуклых задач, а для поиска двойственных переменных используется метод эллипсоидов, что, по словам авторов, должно приводить к более быстрой сходимости по сравнению с субградиентным методом. Однако, известно, что метод эллипсоидов малоэффективен для задач большой размерности.

В настоящей работе предлагается метод решения исходной невыпуклой задачи, основанный на решении серии (аппроксимирующих) выпуклых задач методом переменных направлений (ADMM) [1], который обладает следующими замечательными свойствами: он более устойчив по сравнению с методом двойственной декомпозиции и также допускает декомпозицию задачи, что может быть использовано для разработки распределенных алгоритмов.

### Постановка задачи

Рассматривается OFDMA беспроводная сеть с  $L$  сотами совместно использующими частотный ресурс разделенный на  $N$  групп/блоков. Считается что задача распределения частотных ресурсов на текущий момент решена и

известно какому пользователю  $k$  выделен частотный ресурс  $n$  в соте  $l$ :  $k(l,n)$ . Также известен приоритет/веса этих пользователей  $w_{k(l,n)} > 0$ . Задача управления мощностью ставится как задача поиска оптимального распределения мощностей таким образом, что максимизируется взвешенная сумма скоростей передачи данных обслуживаемых пользователей  $k$ :

$$\begin{aligned} \max_{0 \leq P \leq S_{max}} \quad & \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N w_{k(l,n)} R_{lk(l,n)}^n(P^n) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{n=1}^N P^n \leq P_{max}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P = ((P^1)^T, \dots, (P^N)^T)^T \in \mathbb{R}^{NL}$ ,  $P^n = (P_1^n, \dots, P_L^n)^T \in \mathbb{R}^L$ ,  $P_l^n$  – спектральная плотность мощности в соте  $l$ , выделенная ресурсу  $n$ .  $P_{max} \in \mathbb{R}^L$  и  $S_{max} \in \mathbb{R}^{NL}$  – вектора, состоящие из элементов  $P_{l,max}$  и  $S_{l,max}^n$  соответственно, и определяющие максимальный бюджет мощности и максимальную спектральную мощность в соте  $l$ . Здесь и далее неравенства/равенства с векторами понимаются как покомпонентные. Скорость передачи данных определяется по формуле Шенона  $R_{lk(l,n)}^n(P^n) = \log(1 + \text{SINR}_{lk(l,n)}^n(P^n))$ , где

$$\text{SINR}_{lk(l,n)}^n(P^n) = \frac{P_l^n G_{lk(l,n)}^n}{\sigma^2 + \sum_{j=1, j \neq l}^L P_j^n G_{jk(l,n)}^n}$$

есть отношение сигнал-смесь помехи с шумом  $\sigma^2$  (SINR),  $G_{jk(l,n)}^n = |h_{jk(l,n)}^n|^2$ ,  $h_{jk(l,n)}^n$  – характеристика канала между базовой станцией соты  $j$  и пользователем  $k$  использующим ресурс  $n$  соты  $l$ .

### Описание предложенного метода

Для любых  $z \geq 0$  и  $z_0 \geq 0$  верно следующее неравенство [3], выполненное как равенство при  $z = z_0$

$$\alpha \log z + \beta \leq \log(1 + z), \quad \alpha = \frac{z_0}{1 + z_0}, \quad \beta = \log(1 + z_0) - \frac{z_0}{1 + z_0} \log z_0. \quad (2)$$

Применяя его к невыпуклой задаче (1) и делая замену переменных  $\tilde{P}_l^n = \log(P_l^n)$ , получим задачу (апроксимирующую невыпуклую) максимизации вогнутой функции при выпуклых ограничениях:

$$\begin{aligned} \max_{\tilde{P} \leq \log(S_{max})} \quad & \sum_{n=1}^N \phi_n(\tilde{P}^n) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L w_{k(l,n)} \left[ \alpha_l^n \log(\text{SINR}_{lk(l,n)}^n(\exp(\tilde{P}^n))) + \beta_l^n \right] \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{n=1}^N \exp(\tilde{P}^n) \leq P_{max}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом решение задачи невыпуклой оптимизации (1) можно свести к решению серии задач выпуклой оптимизации (3). Начать серию можно с  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0$ , что соответствует режиму высоких SINR. Далее при фиксированных  $\alpha$  и

$\beta$  решается задача выпуклой оптимизации (3). Затем  $\alpha$  и  $\beta$  пересчитываются по формуле (2), где  $z_0$  равно SINR в последней найденной точке. Процесс повторяется до сходимости целевой функции к некоторому значению или достижения максимального числа итераций [3, 4].

Для решения выпуклой задачи оптимизации с нелинейными ограничениями (3) предлагается использовать двойственную версию метода переменных направлений (ADMM) [2], в которой метод ADMM применяется для решения двойственной к (3) задачи:

$$\max_{\lambda} g(\lambda) = \sum_{n=1}^N g_n(\lambda), \quad g_n(\lambda) = \inf_{\tilde{P}^n \leq \log(S_{max}^n)} -\phi_n(\tilde{P}^n) + \left\langle \lambda, \exp(\tilde{P}^n) - \frac{P_{max}}{N} \right\rangle,$$

где  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  обозначает скалярное произведение векторов,  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_L)^T \in \mathbb{R}^L$  – вектор из множителей Лагранжа. Эту задачу можно переписать в эквивалентной форме

$$\begin{aligned} \min_{\lambda, z} \quad & \sum_{n=1}^N -g_n(z_n) \\ \text{s.t.} \quad & \lambda - z_n = 0, z_n \geq 0, n = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

где  $z_n \in \mathbb{R}^L$  – новые переменные,  $z \in \mathbb{R}^{NL}$ . Запишем модифицированную функцию Лагранжа для задачи (4)

$$L_{\rho}(\lambda, z, y) = \sum_{n=1}^N \left[ -g_n(\lambda) + \langle y_n, \lambda - z_n \rangle + \frac{\rho}{2} \|\lambda - z_n\|^2 \right],$$

где  $y \in \mathbb{R}^{NL}$  – вектор из множителей Лагранжа,  $\rho > 0$  – параметр квадратичного штрафа. Применяя метод переменных направлений [1,2] для задачи (4), получим следующий алгоритм решения выпуклой задачи (3)

1. Выбираем  $\rho > 0$ ,  $z_n^{(0)}$ ,  $y_n^{(0)}$ ,  $n = 1, \dots, N$  и повторяем следующие шаги, пока не выполнится критерий остановки

$$2. \quad \lambda^{(k+1)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( z_n^{(k)} - \frac{1}{\rho} y_n^{(k)} \right)$$

3. Для каждого  $n = 1, \dots, N$  параллельно решаем  $N$  выпуклых задач

$$\tilde{P}^{n(k+1)} = \underset{\tilde{P}^n \leq \log(S_{max}^n)}{\operatorname{argmin}} \left[ -\phi_n(\tilde{P}^n) + \frac{\rho}{2} \sum_{l=1}^L \left[ \max \left\{ 0, \lambda_l^{(k+1)} + \frac{1}{\rho} \left( y_{ln}^{(k)} + e^{\tilde{P}_l^n} - \frac{P_{l,max}}{N} \right) \right\} \right]^2 \right]$$

$$z_{ln}^{(k+1)} = \max \left\{ 0, \lambda_l^{(k+1)} + \frac{1}{\rho} \left( y_{ln}^{(k)} + \exp(\tilde{P}_l^n)^{(k+1)} - \frac{P_{l,max}}{N} \right) \right\}, l = 1, \dots, L$$

$$4. \quad y_n^{(k+1)} = y_n^{(k)} + \rho \left( \lambda^{(k+1)} - z_n^{(k+1)} \right), n = 1, \dots, N$$

где  $k$  – номер итерации. Можно использовать критерий остановки и адаптивный метод выбора параметра  $\rho$ , описанные в [1].

Данный алгоритм совместно с описанным ранее алгоритмом обновления  $\alpha$  и  $\beta$  может служить основой для разработки распределенных алгоритмов решения (субоптимального) исходной невыпуклой задачи (1).

### **Результаты численного моделирования и заключение**

Для сравнения методов проводилось моделирование сети с циклической топологией, состоящей из  $L=37$  сот. Расстояние между базовыми станциями 2,5 км. Полоса частот шириной 10 МГц поделена на  $N=50$  блоков,  $P_{l,max} = 40$  Вт. В каждой соте 20 пользователей равномерно распределены на расстоянии от 0,6 до 0,9 от радиуса соты и движутся со скоростью 3 км/ч. Также моделировались каналы с логнормальными и быстрыми замираниями.

При решении задачи (1) предложенным методом и методом из работы [4], использующих решение серии выпуклых задач (3), уже после первой внешней (по  $\alpha$  и  $\beta$ ) итерации получилось решение с лучшим значением целевой функции, чем при решении двойственной к невыпуклой задаче (1) субградиентным методом [5]. При этом на каждой внешней итерации для предложенного метода потребовалось примерно в среднем в 150 раз меньше внутренних итераций по обновлению множителей Лагранжа, чем для метода [4]. Это можно объяснить эффективностью и устойчивостью метода ADMM [1] и малой эффективностью метода эллипсоидов в задачах большой размерности и тем, что для каждой внешней итерации метода [4] требуется задавать новый эллипсоид, ограничивающий множество возможных значений множителей Лагранжа, в отличие от предложенного метода, где начальные значения множителей Лагранжа могут быть взяты с предыдущей внешней итерации.

Предложенный метод может быть использован для разработки распределенных алгоритмов управления мощностью. Его эффективность продемонстрирована результатами численного моделирования.

### **Список литературы**

1. Boyd S., Parikh N., Chu E. et al. Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers // Foundations and Trends in Machine Learning. 2011. Vol. 3, no. 1. P. 1–122.
2. Fukushima M. Application of the Alternating Direction Method of Multipliers to Separable Convex Programming Problems // Computational Optimization and Applications. 1992. Vol. 1. P. 93–111.
3. Papandriopoulos J., Evans J. Low-Complexity Distributed Algorithms for Spectrum Balancing in Multi-User DSL Networks // In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. 2006. Vol. 7. P. 3270–3275.
4. Venturino L., Prasad N., Wang X. Coordinated Scheduling and Power Allocation in Downlink Multicell OFDMA Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2009. Vol. 58, no. 6. P. 2835–2848.
5. Yu W., Kwon T., Shin C. Joint Scheduling and Dynamic Power Spectrum Optimization for Wireless Multicell Networks // In Proceedings of the 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems. 2010. P. 1–6.

## ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ

### Аннотация

Для систем критического применения наиболее целесообразна пассивная отказоустойчивость на основе дорогостоящего структурного резервирования – использования многоканальных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). При этом необходимо минимизировать стоимость такой реализации.

### Постановка задачи

С учётом предложенного в [1, 8] скользящего резервирования с восстановлением на основе функционально полных толерантных (ФПТ) элементов, модифицируем известную методику синтеза структурной схемы надёжности на основе процедуры наискорейшего спуска [5].

Пусть ПЛИС (в дальнейшем – система) включает в свой состав  $n$  подсистем. Известны значения вероятности безотказной работы (ВБР)  $P_i$  и стоимости  $W_i$  (где  $i = 1, \dots, n$ ) каждой из подсистем. Имеются  $m$  методов повышения вероятности безотказной работы, например, мажоритарное резервирование (раздельное и глубокое с различной степенью «глубины»), резервирование замещением при нагруженном резерве («горячее»), при облегчённом резерве («тёплое»), при холодном резерве («холодное») [2, 3]. Вводим дополнительный метод пассивно-активной отказоустойчивости – мажоритарное скользящее резервирование с восстановлением на основе ФПТ элементов (рисунок 1).

### Возможные варианты реализации

Рассмотрим новые варианты повышения отказоустойчивости, комбинируемые с известным структурным резервированием:

$$1 \text{ вариант } P_{mc} = [3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}] \cdot e^{-\lambda_{\text{об}} t};$$

$$2 \text{ вариант } P_{mc} = [3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}] [3e^{-2\lambda_{\text{об}} t} - 2e^{-3\lambda_{\text{об}} t}];$$

$$3 \text{ вариант } P_{cm} = [3e^{-\frac{2\lambda}{k} t} - 2e^{-\frac{3\lambda}{k} t}]^k [3e^{-2\lambda_{\text{об}} t} - 2e^{-3\lambda_{\text{об}} t}]^k.$$

Интенсивность отказов каналов определяется формулой

$$-\frac{1}{t} \ln \left\{ \left[ \sum_{i=n}^{n+m} C_{n+m}^i \cdot e^{-i\lambda \cdot t} \cdot (1 - e^{-\lambda t})^{n+m-i} + \sum_{j=1}^{\left[ \frac{m}{r} \right]} C_{n+m}^{m+j} \cdot e^{-(n-j)\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{m+j} \right] e^{-\lambda_{\text{об}} t} \right\} = \lambda_g \quad (1)$$

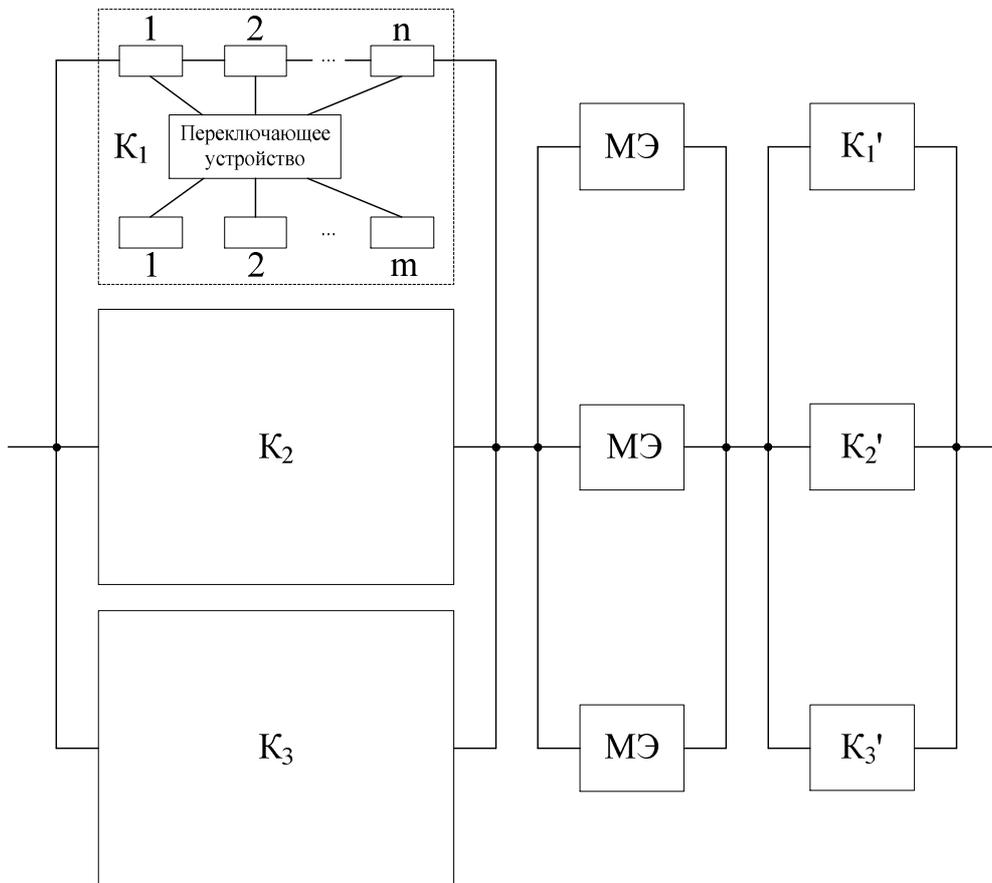


Рис. 1. Пассивно-активная отказоустойчивость – мажоритарное скользящее резервирование конфигурируемых логических блоков с восстановлением на основе ФПТ элементов

При этом стоимость системы увеличивается по сравнению с обычным мажоритированием:

$$C_{\text{м}} = 3C_{\lambda} + 3C_{\text{мэ}} + 3C_{\text{ин}}, \quad (2)$$

где  $C_{\lambda}$  – стоимость одного канала,  $C_{\text{мэ}}$  – стоимость мажоритара,  $C_{\text{ин}}$  – стоимость источника питания. Задержка прохождения сигнала увеличивается всего на величину задержки одного мажоритара  $\tau_{\text{мэ}}$ .

В случае глубокого мажоритирования:

$$C_{\text{зм}} = 3C_{\lambda} + 3kC_{\text{мэ}} + 3C_{\text{ин}}, \quad (3)$$

а задержка прохождения сигнала увеличивается на величину задержки  $k$  мажоритаров  $k \tau_{\text{мэ}}$ .

Имеется ещё вариант

$$C_{\text{м3из5}} = 5C_{\lambda} + 5C_{\text{мэ}} + 5C_{\text{ин}}. \quad (4)$$

Даны также ограничения на применение этих вариантов по подсистемам. Вариант резервирования имеет вид вектора:

$$(k_i, \eta); i = \overline{1, n}; \eta = \overline{1, m} \quad (5)$$

где  $n$  – количество подсистем,  $m$  – количество вариантов повышения вероятности безотказной работы.

Причём в общем случае этот вектор учитывает и сложность (стоимость и вероятность безотказной работы дополнительных устройств – мажоритарных схем, переключающих устройств и пр.)

Две основные постановки задачи оптимизации структурной схемы надёжности (СН) системы выглядят следующим образом:

1) найти  $(k_i, \eta) : W_c \rightarrow \min$  при  $P_c(t) \geq P_c^{зад}(t)$ ;

2) найти  $(k_i, \eta) : P_c(t) \rightarrow \max$  при  $W_c \leq W_c^{зад}$ .

На первом этапе оптимизации по первому критерию добиваются выполнения условия  $P_i(t) \geq P_c^{зад}(t)$ , то есть ВБР каждой из подсистем должна быть не хуже заданной.

В результате, если получают

$$\prod_{i=1}^n P_i(t) < P_c^{зад}(t) \quad (6),$$

то приступают ко второму этапу оптимизации. Соответствующее резервирование берётся за нулевое.

На втором этапе итеративно увеличивают резервы.

Определение того, на каком участке необходимо увеличить резервы, осуществляется итеративно по наибольшему приращению ВБР на единицу стоимости в соответствии с выражением для градиентной функции [4, 5]:

$$(\delta_i^j)^* = \max\{\delta_i^j\} \text{ для } i = \overline{1,5}, \delta_i^j = \frac{P_i^{j+1}(t) - P_i^j(t)}{W_i \cdot P_i^{j+1}(t)} \quad (7),$$

где  $j$  – номер итерации, начинающийся с нуля – это СН, полученная на первом этапе.

На рисунке 2 приведены варианты повышения отказоустойчивости в зависимости от типа ПЛИС [6, 7].

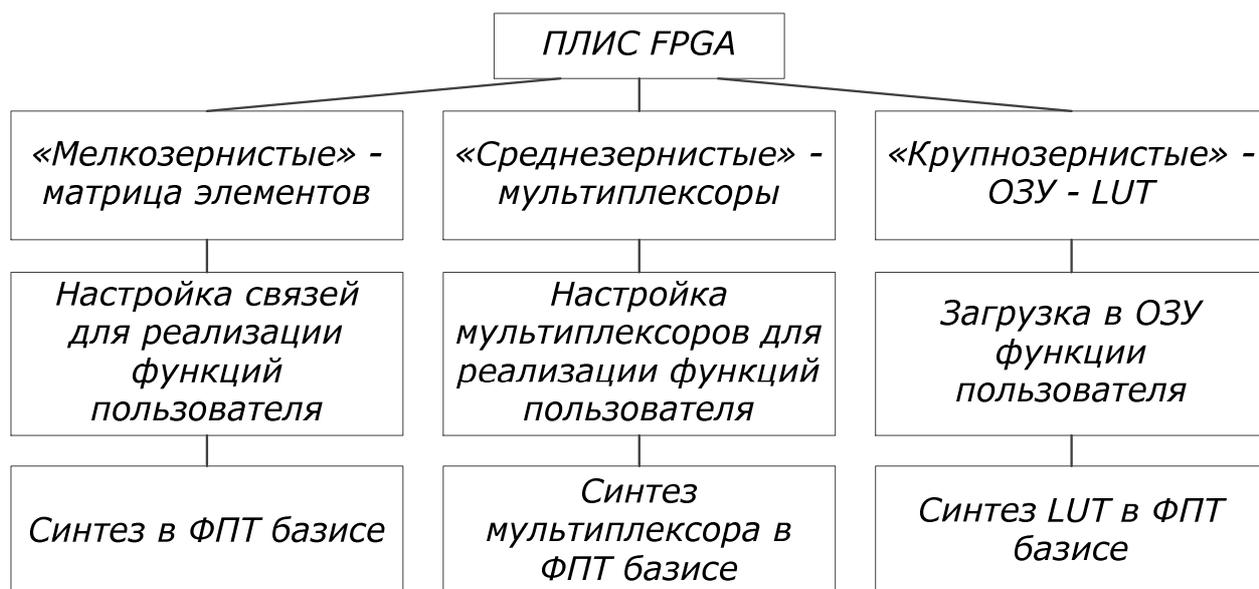


Рис. 2. Варианты реализации конфигурируемых логических блоков на ФПТ элементах по типам ПЛИС

## **Заключение**

В последние годы в связи с участвовавшими техногенными катастрофами, террористическими актами появились термины «катастрофоустойчивость», «катастрофобезопасность». Анализ тенденций развития науки и технологии показывает, что интеллектуальная цифровая аппаратура новой информационной цивилизации будет обладать способностью самовосстановления, адаптации к отказам и повреждениям, например, путем отключения пораженных участков и реализации требуемых функций на оставшемся количестве элементов с возможным допустимым замедлением скорости.

Исследования планируется проводить в следующих направлениях:

- детальной проработки алгоритмов и программ поиска базисов мелкозернистых ПЛИС;
- использования избыточных базисов для диагностики логики ПЛИС;
- использования новых предложенных подходов для повышения «выхода годных» ПЛИС в частности и СБИС вообще;
- исследования вопроса синтеза последовательностных схем на основе восстанавливаемой логики, в том числе с учётом временных характеристик.

## **Список литературы**

1. Тюрин С.Ф., Греков А.В., Коржев В.С. Скользящее резервирование с восстановлением на основе элементов с избыточным базисом. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 157. С. 38-44.
2. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
3. Кон Е.Л., Кулагина М.М. Надежность и диагностика компонентов инфокоммуникационных и информационно-управляющих систем. Учеб. пособие – Пермь: ПНИПУ, 2012. – 395 с.
4. Пупырев Е.И. Перестраиваемые автоматы и микропроцессорные системы. – М.: Наука, 1984. – С. 191.
5. Евреинов Э.В., Прангишвили И.В. Цифровые автоматы с настраиваемой структурой. – М.: Энергия, 1976. – 240 с.
6. Тюрин С.Ф., Громов О.А., Сулейманов А.А., Греков А.В. Отказоустойчивая ПЛИС со скользящим резервированием на основе ФПТ элементов // Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. № 5, 2011. – Пермь: ПНИПУ, 2011. – С. 102–114.
7. Мельков Н.И, Тюрин С.Ф., Грекова О.В., Греков А.В., Коржев В.С. Оценка эффективности отказоустойчивой ПЛИС на основе функционально-полных толерантных элементов. Материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции «Информация, инновации, инвестиции» 18-19 декабря 2012 г. – Пермь, ЦНТИ, 2012. – С. 23-28.
8. Тюрин С.Ф., Громов О.А., Сулейманов А.А., Греков А.В. Анализ методов обеспечения пассивной отказоустойчивости цифровых устройств и систем // Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. № 5, 2011. – Пермь: ПНИПУ, 2011. – С. 144–153.

## **ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ПРИБЛИЖЕННЫХ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ**

### **Аннотация**

В статье рассмотрены основные особенности и проведен краткий сравнительный анализ использования алгоритмов планирования на основе приближенных методов и различных типов интеллектуальных алгоритмов.

### **Введение**

В последние годы растет число успешных примеров использования мобильных систем в транспортных задачах, задачах автономного инспектирования внешней среды и различных видах автоматизированного обслуживания в промышленных приложениях. При групповом использовании роботов одна из наиболее важных задач связана с планированием траекторий движения каждого из роботов для обеспечения бесконфликтного движения в рабочем пространстве. Планирование должно осуществляться с учетом более предпочтительного варианта обхода всех препятствий, встречающихся на пути роботов, исключая столкновения роботов между собой и выход за границы рабочей зоны. Данная проблема не раз рассматривалась многими исследователями и среди основных высказанных предложений по реализации систем планирования можно выделить точные, приближенные и интеллектуальные способы решения.

Приближенные методы основаны на дискретизации рабочего пространства, когда вместо описания рабочей области и препятствий непрерывными функциями используются дискретные модели внешней среды в сочетании с методами динамического и целочисленного программирования, потенциальных функций и т.д. Интеллектуальные методы также основаны на дискретизации, но при этом включают различные типы алгоритмов на основе технологий мягких вычислений: искусственных нейронных сетей, нечеткой логики и эволюционных алгоритмов. В данной работе проводится сравнительный анализ некоторых приближенных и интеллектуальных алгоритмов планирования движений мобильных роботов, выделение основных этапов решения задачи планирования на их основе и выработка рекомендаций по использованию того или иного метода.

### **Приближенные методы**

Как было уже отмечено, основной особенностью приближенных методов планирования является необходимость дискретизации рабочего пространства. Такой подход позволяет вместо описания рабочей области и препятствий непрерывными функциями использовать дискретные модели внешней среды.

При таком представлении рабочая область разбивается на конечное число прямоугольных элементарных областей, каждая из которых отмечается либо свободной, либо занятой препятствием.

Рассмотрим один из известных приближенных методов [4], в котором с целью получения оптимальных безопасных траекторий используется метод динамического программирования.

Для решения задачи планирования применяется принцип динамического программирования Р. Беллмана, заключающийся в пошаговой процедуре нахождения оптимальной траектории, начиная с конечной точки. Эта процедура описывается рекуррентным соотношением:

$$J_{j+1} = \min_u \{ \Delta J(u) + J_j \},$$

где  $\Delta J(u) = h_k(u) + \ell_k(u)$ ,  $h_k(u)$  - длина элементарного участка траектории,  $\ell_k(u)$  - штраф за приближение  $k$ -го участка траектории к препятствию.

Достоинством такого подхода является универсальность по отношению к виду препятствий и способу их движения. При небольших размерностях дискретного рабочего пространства алгоритм планирования может быть реализован на ПЭВМ без существенных аппаратно-временных затрат, так как все вычислительные операции могут быть сведены к целочисленным. При планировании траекторий движения группы роботов применяется назначение приоритетов для каждого робота в группе и задача планирования движения в многомерном пространстве преобразуется в задачу последовательного планирования траектории для каждого из роботов в пространстве с небольшой размерностью.

Основные сложности использования данного подхода связаны с нерациональным использованием вычислительных ресурсов при групповом планировании движений роботов в задачах с большой дискретностью рабочего пространства. К примеру, при размерности поискового пространства  $100 \times 100 \times 100$  функционал  $J$  вычисляется для каждого элемента матрицы (то есть,  $10^6$  раз). Поэтому аппаратные затраты, связанные с заполнением матрицы, оказываются неоправданно-высокими.

### **Интеллектуальные методы**

Более гибкие возможности поиска предоставляют различные типы алгоритмов на основе технологий мягких вычислений. Отметим некоторые особенности реализации поиска на основе генетических алгоритмов (ГА), нейронных сетей (НС) и нечеткой логики (НЛ).

Решение задачи планирования на основе ГА можно свести к следующим основным этапам [2]:

- формирование модели внешней среды (рабочего пространства);
- кодирование потенциальных решений (формирование хромосом);
- генерация начальной популяции (траекторий, соединяющих точки старта и цели);
- определение критериев выживания популяции на каждом эволюционном этапе и формирование функций соответствия;

- нахождение оптимального решения на каждом этапе эволюции путем вычисления функции пригодности.

К начальному или полученному множеству потенциальных решений применяются генетические операторы (скрещивание, мутация, спрямление и сглаживание), результатом работы которых является получение новых хромосом для последующего отбора среди них лучших решений для следующего поколения. Этот набор действий повторяется итеративно, пока полученное решение не будет удовлетворять заданному критерию. Такими критериями могут быть: минимальная длина маршрута, минимизация времени перемещения в заданную точку и т.д.

Использование НС при решении задачи поиска предполагает следующие этапы [1]:

- формализация задачи планирования;
- выбор топологии сети;
- отображение энергетических взаимодействий нейронов в сети в виде нейронной карты (поверхности);
- расчет полной траектории в виде некоторой процедуры «восхождения» к вершине поверхности (цели).

Решение определяется отображением энергетических взаимодействий нейронов в сети в виде нейронной карты. Значения энергии нейронов на данной нейронной области (ландшафт активации) поступают на вход блока генератора траектории, который в свою очередь и выполняет расчет траектории.

При использовании НЛ можно выделить следующие этапы решения задачи планирования [3]:

- определить входы и выходы создаваемой системы;
- задать для каждой из входных и выходных переменных функции принадлежности;
- разработать базу правил и нечеткие правила выводов.

Для разрабатываемой нечеткой системы выбор нужного правила будет определяться угловым отклонением микроробота от цели и наличием свободных областей в рабочей зоне. Всего в базе правил для рассматриваемого подхода определено 72 правила – по девять вложенных правил, для каждого из восьми значений углового отклонения робота от цели (восемью возможных направлений движения).

Из основных характеристик, обеспечивающих преимущества использования ГА, можно выделить параллельность процесса поиска, вовлечение в поисковую процедуру сразу большего числа потенциальных решений и большое число исследуемых областей в пространстве поиска. Особенностью методов планирования на основе НС является возможность аппаратной поддержки централизованной системы управления на базе стационарных вычислительных комплексов с использованием нейроускорителей, а также использование в нестационарных средах с динамическими препятствиями с организацией пере- или дообучения в реальном времени. Преимуществами использования НЛ является их низкая требовательность к аппаратным ресурсам, а также наличие библиотек с

готовыми макетами для реализации нечетких алгоритмов на микроконтроллерах.

### **Заключение**

Приближенные методы планирования основаны на надежных математических моделях, которые обеспечивают нахождение точного решения. Их недостатками являются сложность математической формализации рабочего пространства и высокие аппаратно-временные затраты на поиск оптимального маршрута. С увеличением числа мобильных роботов, осуществляющих одновременное движение, указанные недостатки ограничивают область применения точных методов, как правило, рабочими пространствами со стационарными препятствиями, когда транспортная задача ставится как планирование маршрута минимальной длины. Более гибкие возможности решения данной задачи предоставляют приближенные и интеллектуальные методы.

Рассмотренный в работе приближенный метод обеспечивает наилучшие результаты при небольших размерностях дискретного рабочего пространства и в группах из нескольких единиц мобильных роботов. Более широкие возможности поиска предоставляют алгоритмы на основе технологий мягких вычислений. При использовании НС, ГА и НЛ количество роботов в группе может достигать от нескольких десятков до нескольких тысяч роботов.

Работа по данной тематике стала возможной благодаря финансированию в рамках Программы №1 ОЭММиПУ РАН и гранта РФФИ 11-08-97016-р\_поволжье\_a.

### **Список литературы**

1. Даринцев О.В. Мигранов А.Б. Использование нейронной карты для планирования траектории мобильного робота // Искусственный интеллект №3, 2009 ИПШ МОН і НАН України “Наука і Освіта” – с.300-307.
2. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Система планирования движения группы мобильных микроботов на основе генетических алгоритмов //Известия РАН. Теория и системы управления, 2007, №3. С. 163-173.
3. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Планирование траекторий движения микробота на базе нечетких правил // ИИ-2011: материалы Межд. науч.-техн. конфер. – Донецк: ИПШ “Наука і Освіта”, 2011. – с. 228-232.
4. Startsev Y., Golovatsky K., Ilyasov B. Autonomous Mobile Robot Flat Path Planning with Usage of Dynamic Programming. // CSIT’2000. Ufa, Semptember 18-23, 2000. Volume 2. pp. 213-217.

## **АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЕБИТОМ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ НА БАЗЕ УЭЦН**

### **Аннотация**

В статье приведены результаты разработки системы автоматического регулирования дебитом нефтедобывающей скважины. Рассмотрены возможности использования различных передаточных функций. Разработана структура и алгоритмы с оптимизацией КПД погружного асинхронного электродвигателя. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

### **Введение**

Эксплуатация нефтяных скважин и добыча нефти при помощи установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) наиболее распространенная технология на российском рынке нефтедобычи. По мере истощения нефтяной залежи особую актуальность приобретают проблемы повышения эффективности разработки месторождений, увеличения добычи нефти, повышения нефтеотдачи пластов, обоснования и выбора оптимальных управляющих воздействий.

Одной из проблем является обоснование и оптимизация алгоритмов автоматического управления. Решение этой задачи связано с выбором критерий оптимизации, выбора объекта управления и разработкой программного обеспечения для выполнения вычислительных экспериментов.

В данной работе рассматривается метод построения системы автоматического управления дебитом нефтедобывающей скважины по критерию минимума потерь в погружном асинхронном электродвигателе.

### **САР дебитом нефтедобывающей скважины на базе УЭЦН с пропорциональным законом регулирования**

На первом этапе исследования разрабатывалась классическая САР с пропорциональным законом регулирования. Коэффициент передачи регулятора выбирался по критериям точности и быстродействия на основе вычислительных экспериментов. В качестве математической модели объекта регулирования использовалась модель, приведенная в [1].

Рассмотрим систему управления электроцентробежным насосом с использованием различных передаточных функций.

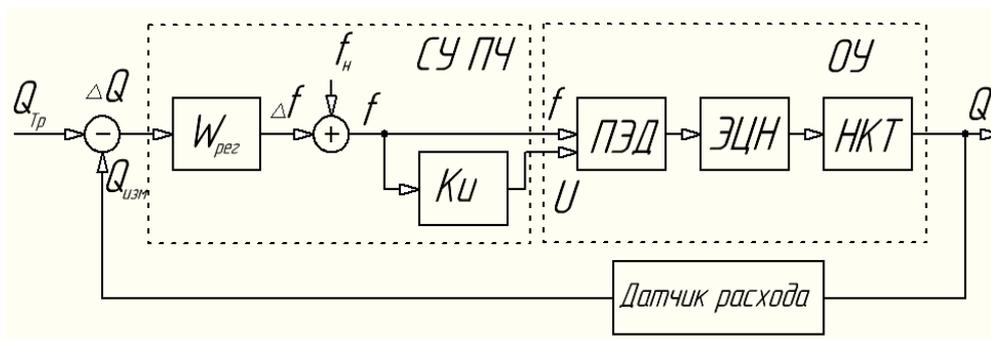


Рис. 1. Система управления УЭЦН

Система состоит из:

- ОУ, в который входят погружной электродвигатель (ПЭД), электроцентробежный насос (ЭЦН) и жидкость в насосно-компрессорной трубе (НКТ);
- СУ ПЧ, в который входит передаточная функция регулятора частоты и напряжения;
- датчика расхода.

Система постоянно контролирует дебит скважины и на основе этих данных рассчитывает и задаёт управляющие воздействия: частоту и напряжение на выходе ПЧ. Выбор частоты в реальных условиях ограничен 40÷70 Гц. Расчет напряжения осуществляется по пропорциональному закону:

$$U = k_u f, \quad (1)$$

Выбор изменения частоты зависит от вида передаточной функции  $W_{рег}$ . Рассмотрим пропорциональную передаточную функцию  $W_{рег}$ :

$$W_{рег1} = k_f, \quad (2)$$

Для анализа влияния передаточной функции  $W_{рег}$  на систему было проведено математическое моделирование в программной среде *Scilab*. В ходе математического моделирования использовались математические модели ПЭД, ЭЦН и жидкости в НКТ.

Результаты математического моделирования при пропорциональной передаточной функции представлены на рисунке 2.

При использовании пропорциональной передаточной функции возникает проблема выбора коэффициента пропорциональности  $k$ . Основные критерии выбора коэффициента  $k$  – это время перехода в новое рабочее состояние и точность достижения требуемого дебита:

$$e = \frac{Q_{mp} - Q_{изм}}{Q_{mp}}, \quad (3)$$

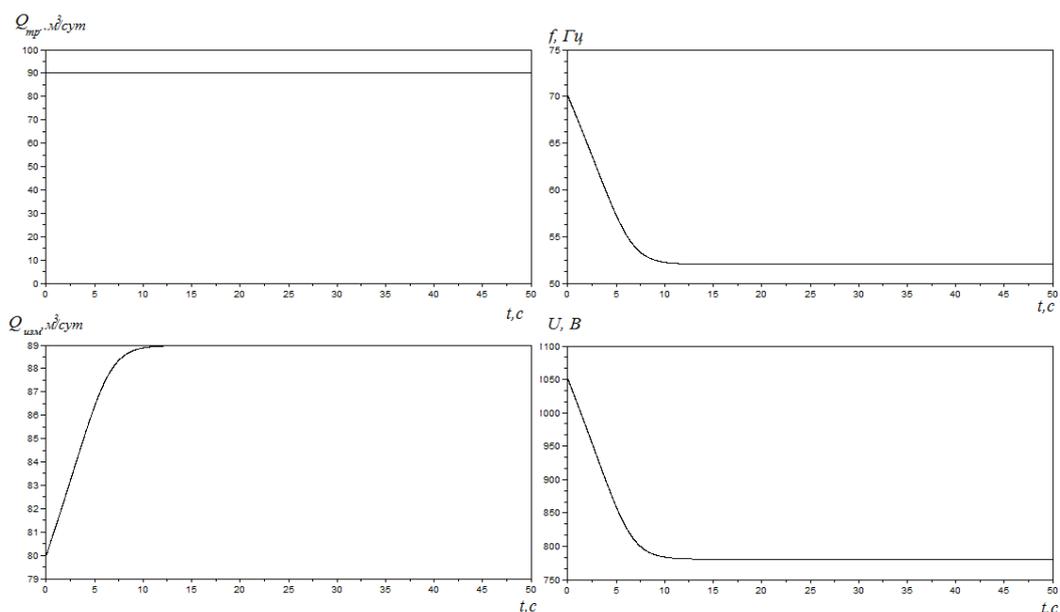


Рис. 2. Графики перехода системы в новую рабочую точку из номинального режима при передаточной функции  $W_{рег1}$

Изменим значения  $k$  от 0,1 до 10 и определим время перехода в новое рабочее состояние  $t_{уст}$  и точность  $e$ . Соответствующие графики представлены на рис. 3 и рис. 4.

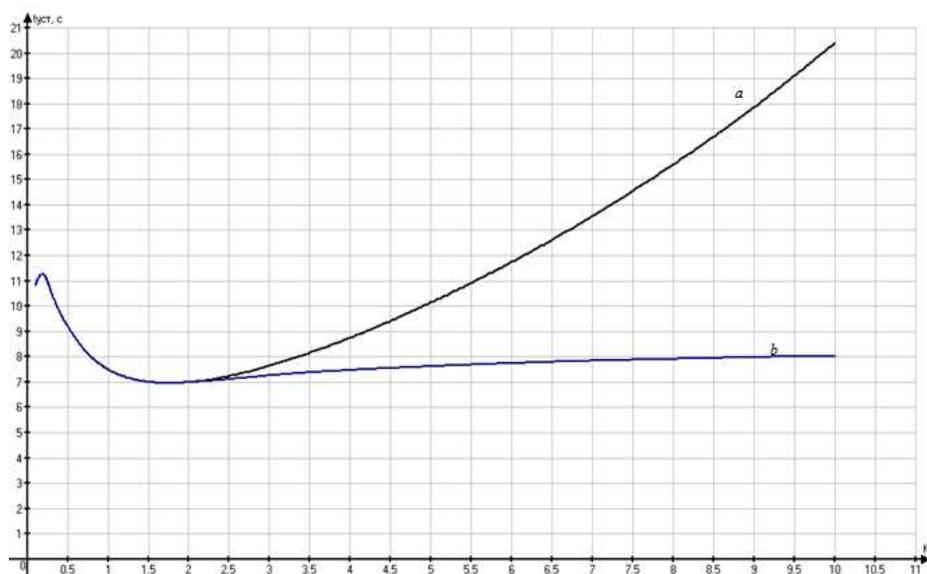


Рис. 3. графики зависимости времени перехода в новое рабочее состояние от коэффициента  $k$ :  $a$  – без ограничения частоты,  $b$  – с ограничением частоты

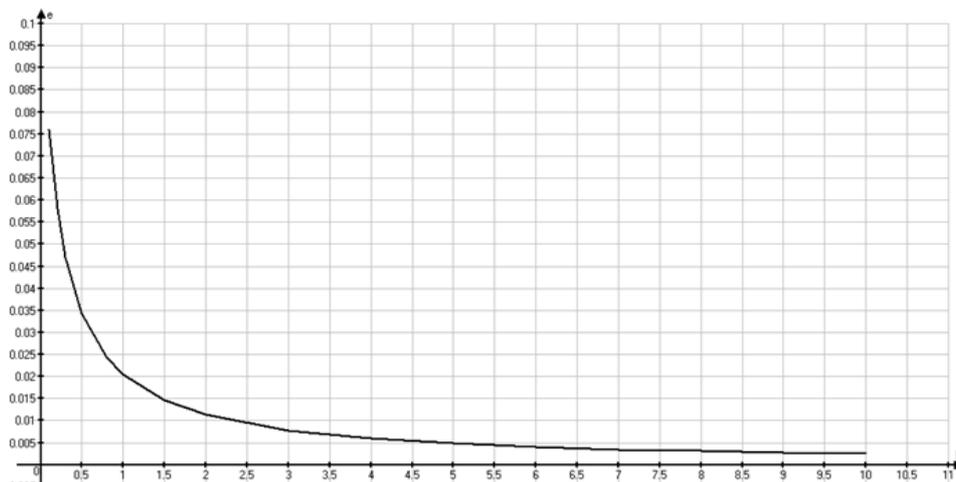


Рис. 4. Графики зависимости  $\epsilon$  от коэффициента  $k$

Результаты математического моделирования при использовании передаточной функции в виде интегратора (4) представлено на рисунке 5.

$$W_{рег2} = \frac{k_f}{s}, \quad (4)$$

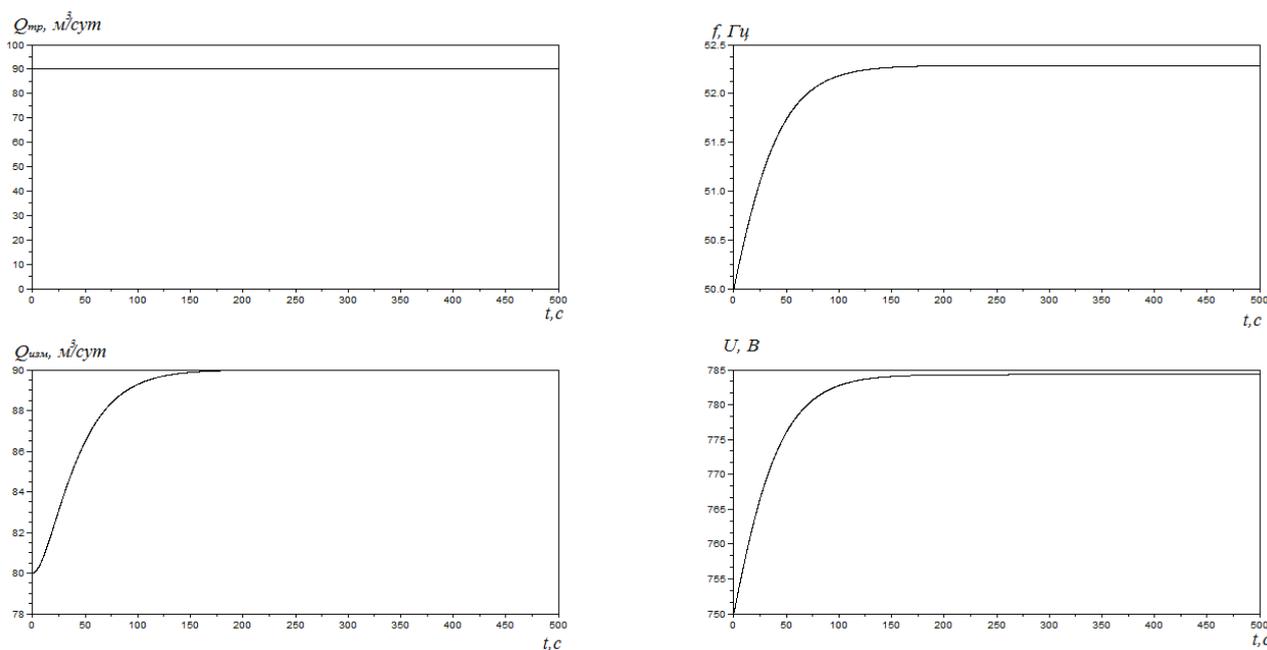


Рис. 5. Графики перехода системы в новую рабочую точку из номинального режима при передаточной функции  $W_{рег2}$

При использовании передаточной функции  $W_{рег2}$  был экспериментально выбран  $k_f$ , равный 0.005. Увеличение коэффициента  $k_f$  приводит к появлению колебательности в процессе установления значения дебита. Уменьшение коэффициента  $k_f$  приводит к увеличению времени переходного процесса.

Как видно из рисунков 2 и 5 использование передаточной функции  $W_{рег2}$  позволяет достичь точного требуемого дебита при плавном изменении частоты, но при этом время переходного процесса увеличивается, что не является первостепенным в выборе  $W_{рег}$  вследствие медленных процессов в скважине.

## САР дебитом нефтедобывающей скважины на базе УЭЦН с оптимизацией КПД асинхронного электродвигателя

На втором этапе исследований разработаны структура и алгоритмы с оптимизацией КПД электродвигателя. В основе алгоритмов положен принцип минимизации потерь приведенный в [2].

Для оптимизации процесса управления УЭЦН по критерию минимума потерь рассмотрим структуру, представленную на рисунке 6.

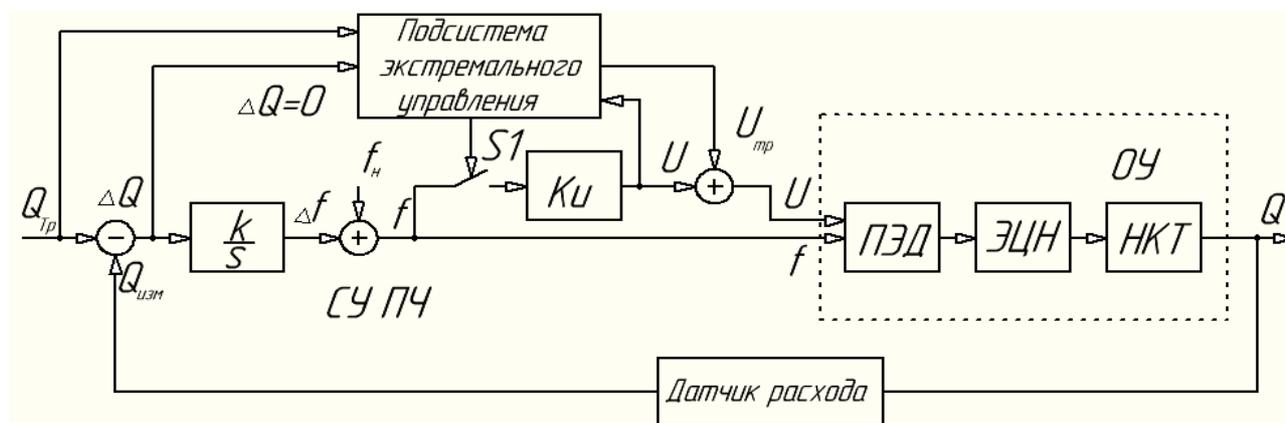


Рис. 6. Система оптимального управления УЭЦН

Система состоит из:

- ОУ;
- СУ ПЧ;
- Подсистема экстремального управления;
- датчика расхода.

Система сначала выходит на требуемый дебит  $Q_{тр}$  (S1 замкнут). После чего включается подсистема экстремального управления, и ключ S1 размыкается. Подсчитываются потери в данном режиме работы. К предыдущему значению напряжения прибавляется небольшое приращение, которое система воспринимает как возмущающее воздействие. Происходит автоматическая подстройка частоты управляющего воздействия для достижения требуемого дебита. При достижении требуемого дебита  $Q_{тр}$  происходит подсчет потерь и принятие решения дальнейшего поиска оптимальных управляющих воздействий.

Результаты математического моделирования при оптимальном управлении представлены на рис. 7.

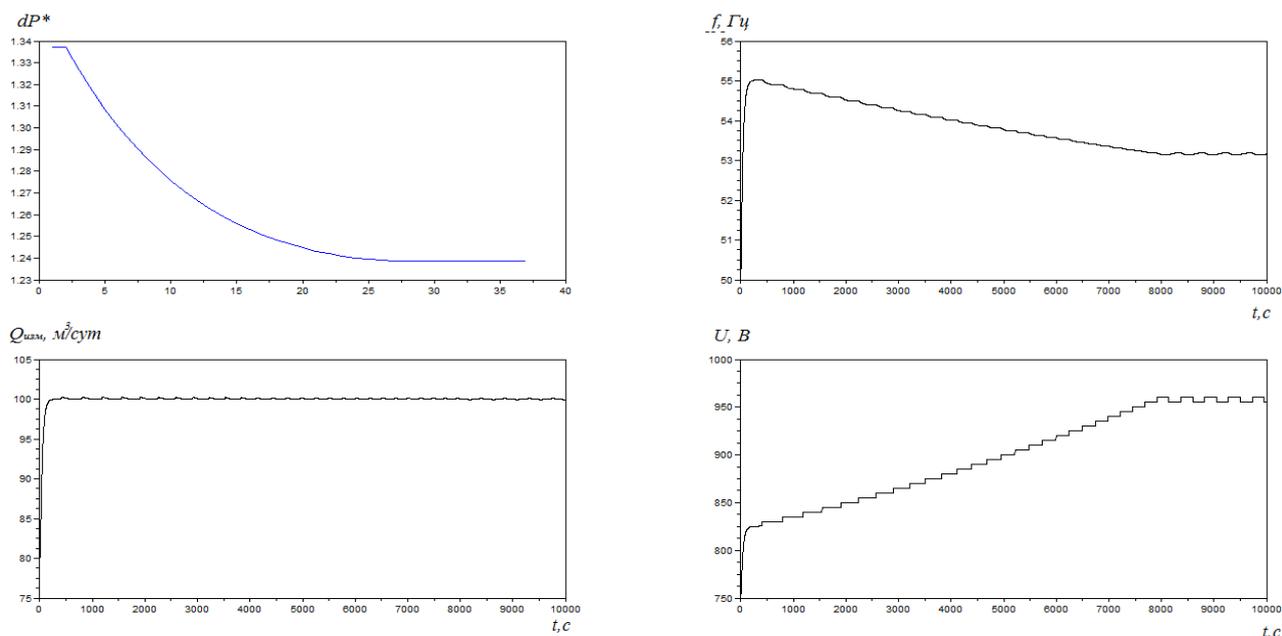


Рис. 7. Графики процесса оптимизации управления УЭЦН

Как видно из графика относительных потерь  $dP^*$  при применении оптимального управления по минимуму потерь КПД системы возрастает. Причем по мере увеличения требуемого дебита выигрыш КПД возрастает.

### Результаты и выводы

1. Разработан подход для выбора оптимальных алгоритмов управления дебитом нефтедобывающей скважины по критерию точности и быстрдействию на основе нелинейных математических моделей скважины.
2. Разработан подход к оптимальному управлению дебитом нефтедобывающей скважины по критерию минимальных потерь в погружном асинхронном электродвигателе.

### Список литературы

1. Нугаев И.Ф. Динамическая модель нефтедобывающей скважины на базе УЭЦН как объекта управления / Нугаев И.Ф., Искужин Р.В. // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2012. №5. С. 31-46.
2. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведения / Браславский И.Я., Ишманов З.Ш., Поляков В.Н.; Под ред. Академика Браславский И.Я. – М.: «Академия», 2004. – 256 с.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ SCADA-СИСТЕМ

### Аннотация

В статье рассматриваются назначение и основные принципы компьютерного моделирования SCADA-систем, применяемых для управления процессами различных отраслей промышленности. Для принятия управленческих решений в них используются математическая модель объекта управления, позволяющая автоматизировать решения задач анализа и синтеза

### Назначение компьютерного моделирования SCADA-систем

Сложные технологические объекты (СТО) различных отраслей промышленности представляют собой комплексы оборудования, в котором протекают физически разнообразные технологические процессы (ТП). Их наблюдаемые переменные зачастую сильно зависят от изменяющихся параметров и характеристик природной среды. В свою очередь эти же процессы могут оказывать высокое техногенное воздействие на ее объекты. К взаимодействующим с объектами природной среды СТО относятся промышленные объекты водо- и теплоснабжения городов, производственные объекты атомной и нефтехимической промышленности, гидро-, теплоэлектростанции и другие. На их функционирование накладываются экономические ограничения, направленные на получение максимально возможной прибыли, и экологические ограничения, представляющие собой минимизацию техногенного воздействия на объекты природной среды (ОПС).

Современные SCADA-системы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Выполняя большое количество необходимых для управления функций, они не позволяют в должном объеме автоматизировать процесс определения экономически эффективных и экологически безопасных режимов функционирования. Решение задач данного класса может быть произведено с помощью математических моделей объекта управления, адекватно описывающей протекающие в нем процессы и позволяющих решать задачи многовариантного анализа и параметрического синтеза. В свою очередь существующие SCADA-системы не обладают функциями построения и использования математических моделей, интегрированных в процесс управления СТО.

В данной работе предлагается архитектура компьютерной модели SCADA-системы с математической моделью (ММ) объекта управления. Реализуя основные функции SCADA-системы, она позволяет определять, устанавливать и поддерживать оптимальные характеристики технологических процессов с учетом накладываемых экологических и экономических ограничений. Процесс построения, исследования и использования такой модели в данной работе назван компьютерным моделированием SCADA-систем.

## Структура компьютерной модели SCADA-система

Помимо определения, установления и поддержания оптимальных в рамках заданного критерия ТП, протекающих в СТО, компьютерная модель SCADA-системы должна выполнять основные типичные для них функции. К ним относятся сбор, первичная обработка, накопление и визуализация значений параметров и наблюдаемых характеристик, обнаружение и отображение информации о критических, предаварийных и аварийных ситуациях, архивирование истории изменения значений параметров и характеристик процесса.

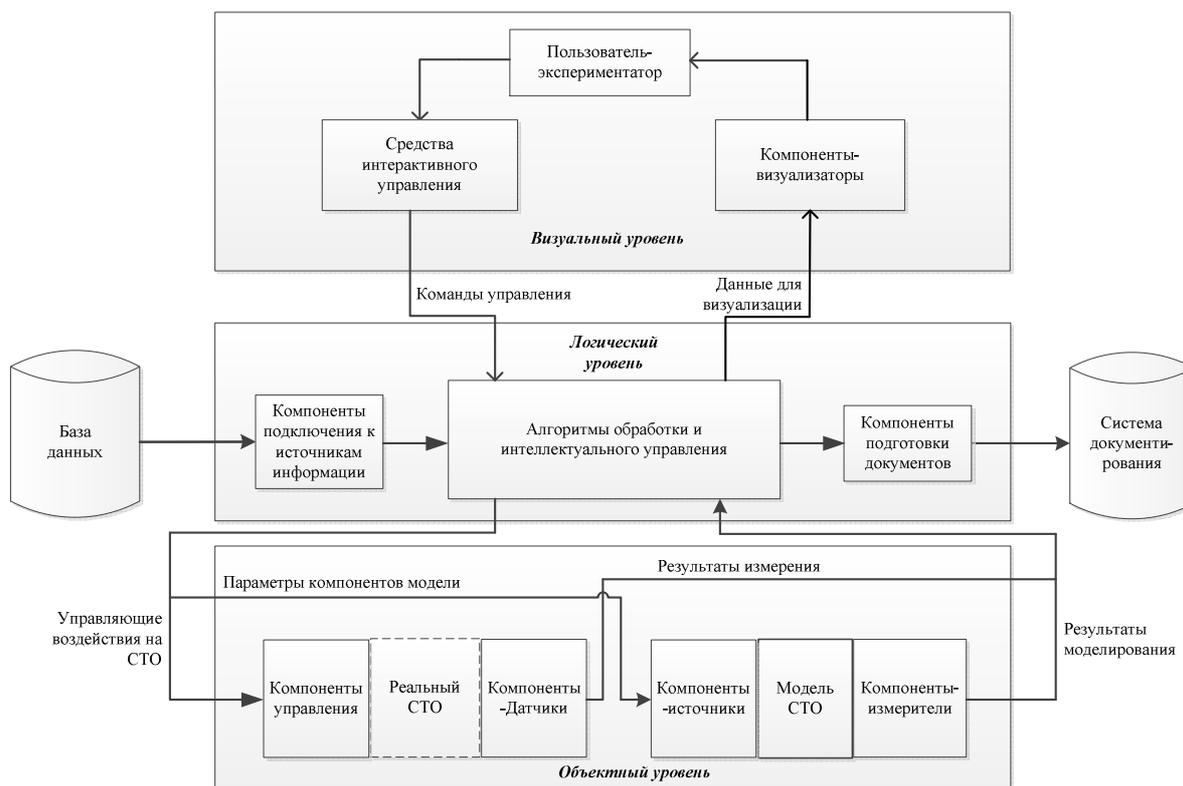


Рис. 1. Структура компьютерной модели SCADA-системы

Для выполнения данных функций и обеспечения полного процесса управления компьютерная модель SCADA-системы может быть построена на основе принципа многоуровневого компьютерного моделирования [1]. Согласно ему она формируется на трех взаимосвязанных уровнях (рис. 1):

- визуальном, где располагаются программно-реализованные средства визуализации данных измерений наблюдаемых характеристик управляемого СТО и результатов анализа его ММ, а также находятся средства интерактивного управления параметрами компонентов СТО и его модели;

- логическом, включающем в себя математико-алгоритмические блоки параметризации модели объекта, обработки результатов измерения и моделирования, определения значений параметров СТО, удовлетворяющих накладываемым на ТП экологическим и экономическим ограничениям;

- объектном, содержащем средства подключения к реальному СТО и его математическую модель.

Программной реализацией предложенного принципа является система компьютерного моделирования SCADA-систем (СКМ SCADA-систем), основанная на универсальном методе компонентных цепей [2]. Его основными понятиями является понятие компонента, как функционально неделимой единицы моделируемого объекта или системы, функционирующей по предписанному ей определенному закону, и компонентной цепи, представляющей собой совокупность соединенных между собой компонентов.

Многослойный графический редактор СКМ SCADA-систем позволяет формировать компьютерную модель SCADA-системы на трех взаимосвязанных слоях. Каждый из них является отображением соответствующего уровня моделирования.

На объектном слое располагаются средства подключения модели SCADA-системы к реальному объекту управления и разрабатывается его математическая модель, состоящая из взаимосвязанных компонентов. Средствами подключения к СТО являются «Компоненты управления» (рис. 1), с помощью которых осуществляются управляющие воздействия, и «Компоненты-датчики», доставляющие результаты измерений в компьютер. Все компоненты данного класса, взаимодействуют с одним универсальным измерительно-управляющим контроллером.

ММ ТСО, представленная совокупностью взаимосвязанных компонентов, подлежит анализу с помощью универсального вычислительного ядра [3]. Полученные результаты моделирования передаются с объектного на логический уровень с помощью «Компонентов-измерителей», имеющих свои отображения на обоих слоях.

На логическом слое реализуется алгоритм управления СТО. Его основной задачей является выработка управляющих воздействий на реальный объект управления, имеющих рекомендательный для оператора SCADA-системы характер. Их получение производится с использованием алгоритмов минимизации целевых функций, составленных относительно поступающих с объектного слоя результатов моделирования и данных измерений характеристик реального объекта. Помимо этого компонентами логического слоя являются «Компоненты подключения к источникам информации», позволяющие предоставить в компьютерную модель SCADA-системы актуальные данные из различных баз данных предприятия. Автоматизированное протоколирование процесса управления и оформление специальных документов производится «Компонентами подготовки документов», располагающихся на логическом слое и дополняющих систему документирования.

Результаты измерения и моделирования, пройдя предварительную математическую подготовку, передаются для визуализации в «Компоненты-Визуализаторы». Они имеют свои отображения на одновременно визуальном и на логическом слоях. Основными компонентами логического уровня являются математические, логические и алгоритмические компоненты, осуществляющие вычисление параметров компонентов модели, обработку результатов измерения и моделирования, подготовку ее к визуализации. Для решения задач управления, направленных на определение оптимальных режимов функционирования СТО, применяются методы оптимизации. При этом целевая функция задается пользователем в графическом редакторе в естественно-математическом виде, а

затем интерпретируется в формат компонентных цепей для ее расчета универсальным вычислительным ядром.

Воздействия пользователя – оператора *SCADA*-системы – на реальный объект и его математическую модель производится с помощью «Компонентов-Регуляторов». Они имеют свои отображения на визуальном слое, с которым манипулирует пользователь, и на логическом слое, применяемом для передачи значений параметров реального объекта или в его модель.

Для изменения значений параметров компонентов ММ объекта управления, расположенной на объектном слое, применяются «Компоненты-Атрибуты». Каждый такой компонент ставится в соответствие определенному параметру выбранного компонента объектного уровня и располагается на логическом слое, где получает значение, являющееся результатом работы некоторого алгоритма. Такой же принцип, основанный на использовании «Компонентов-Атрибутов», позволяет изменять также значения параметров компонентов визуального и логического уровней различных (в том числе и не числовых) типов данных.

### **Заключение**

Предложенная в данной работе многоуровневая компьютерная модель *SCADA*-системы позволяет определять, устанавливать и поддерживать оптимальные режимы функционирования СТО различных отраслей промышленности. Реализующая ее система компьютерного моделирования может стать заменой существующим *SCADA*-системам, используемым для управления ТП промышленного оборудования.

Включая математическую модель объекта управления и средства подключения к различным информационным источникам, предложенная компьютерная модель *SCADA*-системы позволяет адекватно определять экологически безопасные и экономически эффективные режимы функционирования СТО. Помимо этого, такая компьютерная модель может использоваться в научных исследованиях и для обучения управляющего персонала.

### **Список литературы**

1. Дмитриев В.М. Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей *SCADA*-систем для управления сложными технологическими объектами / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа // Информатика и системы управления. – В печати.
2. Арайс Е.А. Автоматизация моделирования промышленных роботов / Е.А. Арайс, В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков. – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.
3. Дмитриев В.М. Универсальное вычислительное ядро для реализации виртуальных лабораторий / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.В. Ганджа // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2004. – № 2. – С. 24-28.

## ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГУСЕНИЧНОГО РОБОТА НИЗКОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ

### Аннотация

Предложена организация системы управления гусеничного робота низкой себестоимости, которая обеспечивает возможность частой модификации этой системы в ходе решения исследовательских задач, выполняемых на базе данного робота.

### Введение

Изначально была поставлена задача разработки мобильного робота повышенной проходимости для проведения научных исследований на его основе.

Одной из важных особенностей проектируемого робота должна была стать способность передвигаться между этажами здания по обычным ступеням. Также требовалась реализация способностей нести на себе несколько килограммов полезной нагрузки и передвигаться по пересеченной местности.

В процессе разработки был реализован гусеничный робот повышенной проходимости с низкой себестоимостью [1].



*Рис. 1. Общий вид гусеничного робота*

От аналогичных разработок данный робот (рис. 1), в первую очередь, отличается не только низкой себестоимостью, но и тем, что он изготовлен из сравнительно дешевых компонентов, легко доступных на потребительском рынке.

Составить впечатление об особенностях передвижения гусеничного робота можно на основе видео проведенных испытаний:

- перемещение внутри здания, в том числе, по ступеням лестниц (см. видео по адресу <http://youtu.be/voXYWlcbhRQ>);
- испытания в сложных условиях мокрого снега, в том числе, перемещение по глубокому снегу (см. видео по адресу <http://youtu.be/eNd2doYKusA>);
- перемещение по наклонной плоскости (см. видео по адресу <http://youtu.be/2jwwln5izFQ>).

Данный вариант робота является основой для проведения научных исследований по следующим направлениям:

- автономное перемещение робота в неизвестной местности, в том числе, по пересеченной местности и между этажами здания, при этом карта местности строится одновременно с перемещением робота по технологии SLAM [4];

- использование уточняющей информации от дополнительных датчиков, например, инфракрасных (ИК) дальномеров, для более точного построения карты местности на основе компьютерного зрения;

- разработка различных алгоритмов компьютерного зрения для автономного робота, например, распознавание жестов, автоматическое слежение и следование за объектами;

- планирование вычислительных процессов реального времени [3] в составе программного обеспечения автономного робота в условиях ограниченных ресурсов.

Поэтому при организации системы управления гусеничного робота, помимо реализации очевидных функций управления, надо также обеспечить:

- модульность аппаратного обеспечения (для удобства модернизации и изменения конфигурации в ходе постановки различных исследовательских задач);

- открытость и гибкость системного и прикладного программного обеспечения (для возможности частой и удобной модификации программного обеспечения);

- низкую себестоимость системы управления.

### **Организация системы управления**

Учитывая данные требования, была разработана система управления гусеничного робота (рис. 2).

Для выполнения требования модульности был переработан корпус робота и разработана модульная система электронных блоков. В частности, реализованы следующие блоки.

- 1) Драйвер двигателей. Данный блок отвечает за работу всех двигателей робота. Он состоит из силовой и логической части. Силовая часть собрана на мощных полевых транзисторах и реле для смены направления движения.

- 2) Контроллер управления, который реализован на базе микроконтроллера *Arduino Nano*. Для удобства он оснащен коммутационными разъемами и светодиодами для контроля работы портов.

- 3) Блок контроля напряжения. В данном блоке расположено несколько емких конденсаторов, для предотвращения провала напряжения в пиковые моменты работы двигателей. Там же расположены датчики напряжения и датчики тока. Данные с этих датчиков поступают в контроллер управления, что позволяет отслеживать соответствующую информацию о состоянии робота.

Центральным блоком (модулем) системы управления является управляющий компьютер на основе материнской платы с форм-фактором *Mini-ITX*. Дорогостоящие промышленные компьютеры и контроллеры не рассматривались из-за их высокой стоимости и стремления сохранить достаточно низкую себестоимость робота. Испытания показали, что данный вариант управляющего компьютера хорошо справляется с поставленными задачами. При этом надо

учитывать особенность реализации корпуса робота, которая позволяет в определенных пределах обеспечивать регулирование температуры внутри корпуса за счет управления потоком воздуха и двойных стенок корпуса [1].



Рис. 2. Организация системы управления гусеничного робота

Взаимодействие человека-оператора с роботом осуществляется на основе удаленного компьютера (ноутбука), на котором функционирует операторское приложение, взаимодействующее с управляющим компьютером робота с помощью канала связи, организованного на базе технологии *Wi-Fi*. В операторском приложении предусмотрена возможность контроля всех параметров робота, а также удаленное управление роботом.

Управляющая программа робота имеет возможность получения данных с датчиков, в том числе, с датчиков, подключаемых к контроллеру управления. Также в управляющую программу поступает видеoinформация от видеокамер, установленных на роботе. В настоящее время в качестве удобного и дешевого варианта видеокамер используются обычные веб-камеры.

Все программное обеспечение робота основано на свободном и бесплатном программном обеспечении, что также обеспечивает выполнение требования низкой себестоимости робота. В частности, применяются:

- операционная система семейства *Linux*;
- библиотека компьютерного зрения *OpenCV* [5, 6];
- пакет *MJPEG-streamer* [7] для передачи видеопотока на удаленный компьютер.

Кроме того, указанное свободное программное обеспечение, применяемое на системном и прикладном уровнях, полностью отвечает заявленному требованию открытости и гибкости. Например, ядро *Linux* позволяет осуществлять исследование в области новых моделей и методов планирования задач ре-

ального времени за счет соответствующих «расширений» ядра [3]. А в сочетании с библиотекой *OpenCV* появляется возможность исследований на стыке компьютерного зрения и планирования задач реального времени [2].

### **Заключение**

Предложенная организация системы управления гусеничного робота обеспечила выполнение заявленных требований, обусловленных необходимостью ее частой модификации в ходе решения исследовательских задач на базе данного робота. Гусеничный робот вместе с указанной системой управления прошел предварительные испытания, которые продемонстрировали работоспособность системы управления при разных условиях эксплуатации.

### **Список литературы**

1. Еремеев И.М., Кавалеров М.В., Южаков А.А. Гусеничный робот повышенной проходимости с низкой себестоимостью // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», СПб., 2012. – С. 241–244.

2. Кавалеров М.В., Матушкин Н.Н. Мехатронная система «шарик на балансирах с веб-камерой» для исследований на стыке компьютерного зрения и планирования задач реального времени // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012). – СПб., 2012. – С. 744–747.

3. Кавалеров М.В. Современное состояние исследований и практических внедрений, связанных с проблемами планирования задач реального времени в системах управления, контроля и измерения // Труды 3-й российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» [Электронный ресурс]: труды и пленарные доклады участников конференции УКИ'12. – М.: ИПУ РАН, 2012. – С. 1360–1372. URL: <http://cmm.ipu.ru/sites/default/cmm12cd/cmm12CDImage.zip> (дата обращения 14.03.2013).

4. Bonin-Font F., Ortiz A., Oliver G. Visual navigation for mobile robots: a survey // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 53, No 3, 2008. – P. 263–296.

5. Bradski G., Kaehler A. *Learning OpenCV*. – O'Reilly Media, 2008. – 556 p

6. OpenCV v2.4.4.0 documentation [Электронный ресурс] URL: <http://docs.opencv.org> (дата обращения 14.03.2013).

7. SourceForge.net: mjpg-streamer. [Электронный ресурс] // Sourceforge. URL: <http://sourceforge.net/apps/mediawiki/mjpg-streamer/index.php> (дата обращения 14.03.2013).

## К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НАБОРА ЭВРИСТИЧЕСКИХ ПРАВИЛ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЙРОСЕТЕВОГО ОПТИМИЗАТОРА ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

### Аннотация

В статье изложены принципы совершенствования работы нейросетевой (НС) надстройки над ПИД-регулятором. Установлен ряд зависимостей между разницей текущего и предшествующего задания и допустимой скоростью протекания переходного процесса. Эти зависимости легли в основу ряда эвристических правил, позволяющих своевременно и более оперативно реагировать на динамические изменения параметров объекта управления (ОУ).

### Введение

Экспериментально установлено, что наиболее реализуемой с практической точки зрения нейросетевой схемой управления является схема на основе автонастройки коэффициентов ПИД-регулятора  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  [1]. Такая схема позволяет учитывать нелинейные свойства объекта, что, в конечном счете, выражается в повышении эффективности работы объекта и снижении его энергопотребления, не внося значительных изменений в существующую систему управления.

Однако в результате многочисленных практических экспериментов было установлено, что НС в чистом виде не способна адекватно управлять объектом, так как достаточно часто система управления переходит в неустойчивое состояние. Данное обстоятельство существенно сдерживает рост практических приложений с НС. Авторами в [2] предлагается модифицированный вариант схемы, где НС встраивается в некоторый блок, названный «Нейросетевой оптимизатор» (ПИД-нейрорегулятор), в котором выполняется оптимизация коэффициентов ПИД-регулятора за счет реализованного алгоритма оперативного обучения сети. В работе [2] мы уже приводили результаты моделирования схемы управления, но при изменении параметров объекта период перенастройки коэффициентов сопровождался достаточно низким качеством переходных процессов. В данной статье в разделе 2 предложен способ решения данной проблемы и сокращения длительности такого периода.

### Реализация схемы управления с ПИД-нейрорегулятором

В пакете Matlab была реализована схема управления (рис.1). Контур управления представлен блоком *object* с ПИД-регулятором (*Subsystem*) с нейронадстройкой (*S-function2 neuc\_PID1*).  $U_i$ ,  $U_p$ ,  $U_d$ ,  $U_{pid}$  – сигналы управления на выходе *i*-, *p*-, *d*-каналов и всего ПИД-регулятора соответственно, *error* – текущее рассогласование. Блок *Saturation2* использован для ограничения

получаемого с ПИД-нейрорегулятора сигнала управления до диапазона [0;100].  $U$  – управляющее воздействие, подаваемое на ОУ.

Для моделирования в качестве объекта использовалась модель, представленная в виде двух аperiodических звеньев первого порядка и звена запаздывания. Данная структура выбрана ввиду того, что, используя ее, возможно описать с заданной точностью большинство технологических объектов, в частности, предприятий горно-металлургического комплекса.

Эксперимент заключался в том, что исследовалась работа схемы в следующих условиях: в период времени с 0 до  $6 \cdot 10^4$  секунд в качестве параметров объекта выступали значения  $K=21$ ,  $T_1=1636$  с,  $T_2=69.4$  с,  $\tau=64$  с, полученные при идентификации пустой муфельной электропечи СНОЛ, далее с  $6 \cdot 10^4$  секунд до  $20 \cdot 10^4$  секунд моделировалось изменение состояния объекта и в качестве параметров  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\tau$  устанавливались другие значения, а с  $20 \cdot 10^4$  секунд до  $40 \cdot 10^4$  секунд объекту возвращались первоначальные параметры.

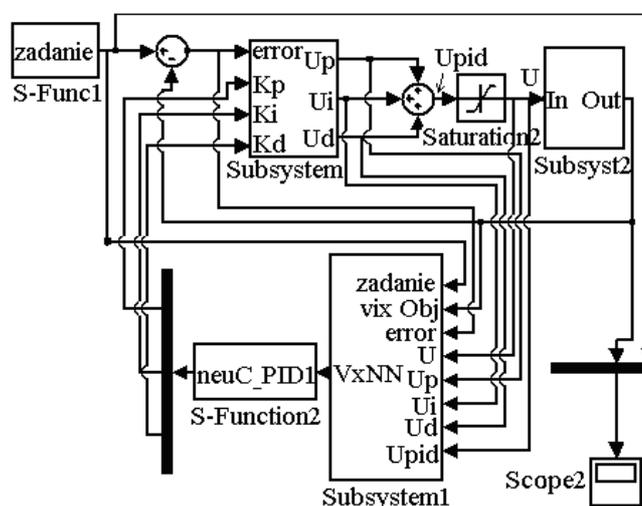


Рис. 1. Реализация в Matlab схемы нейросетевого управления с самонастройкой

Смена заданий производилась путем повторения последовательности значений:  $590^{\circ}\text{C} \rightarrow 640^{\circ}\text{C} \rightarrow 505^{\circ}\text{C} \rightarrow 590^{\circ}\text{C}$ . Среднее время каждого нагрева и остывания составляло 6000 секунд. Для модели с параметрами  $K=21$ ,  $T_1=1636$  с,  $T_2=69.4$  с,  $\tau=64$  с были подобраны оптимальные значения коэффициентов ПИД-регулятора:  $K_P=0.2422$ ,  $K_I=0.0001504$ ,  $K_D=0$ . Регулятор начинал каждый опыт с указанными коэффициентами.

До начала каждого из экспериментов создавалась необученная НС. Она имела трехслойную структуру. Количество и вид входов НС были определены экспериментальным путем. Во входном слое расположено 5 нейронов (будут описаны ниже), в выходном слое – три нейрона (отвечают за коэффициенты ПИД-регулятора  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ). Экспериментально было установлено, что 15 нейронов в скрытом слое является оптимальным числом. В скрытом слое – функция активации гиперболический тангенс, в выходном слое – линейная.

Нейронадстройка над ПИД-регулятором была реализована при помощи средств пакета Matlab – это S-функция *neuC\_PID1* (рис.1).

## Модификации, внесенные в схему нейросетевого управления

Основные дополнения, внесенные в схему С.Омату: 1) внесены ограничения, накладываемые на выходы НС; 2) разработаны правила изменения скорости обучения НС; 3) разработаны правила обучения выхода НС, формирующего  $p$ -канал и 4) формирующего  $i$ -канал; 5) определено количество эпох обучения НС на каждом такте работы схемы.

Эти модификации подробно описаны в [2]. Однако при работе системы управления было выявлено, что в момент смены параметров ОУ качество переходных процессов существенно уменьшается, кроме того, существует тенденция, когда адаптивная нейронадстройка доводит перерегулирование до максимально допустимого значения и далее прекращает его уменьшать. Пример работы такой системы приведен на рис.2.

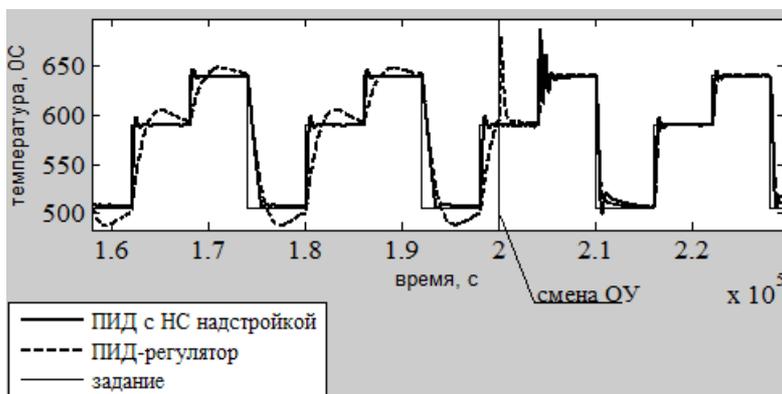


Рис. 2. Выход ОУ, управляемого регулятором с нейросетевым оптимизатором и ПИД-регулятором при обратном переходе с модели  $K=20$ ,  $T_1=5500$  с,  $T_2=41$  с,  $\tau=90$  с на модель пустой печи

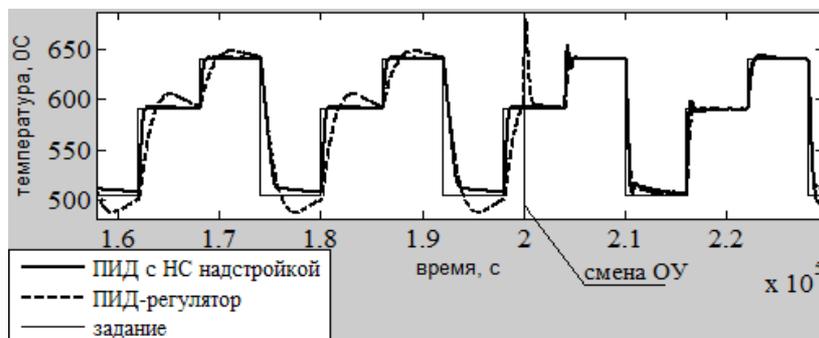
Данные графики позволяют сделать вывод о том, что ПИД-регулятор сразу после смены объекта поднял температуру на  $90^{\circ}\text{C}$ , однако затем стал работать с перерегулированием не более 4%. Система с надстройкой на первом переходном процессе после смены ОУ показала перерегулирование в 45% и высокую колебательность, а затем начала работать с перерегулированием в 6%. Таким образом, сразу после возврата к исходным параметрам ОУ обе системы отработали недостаточно хорошо.

В связи с этим были предложены следующие усовершенствования. Во-первых, экспериментальным путем было установлено, что зависимость между величиной переходного процесса и скоростью его протекания для переходов менее 200 градусов может быть выражена линейным соотношением. И в зависимости от коэффициента отношения величины переходного процесса к его скорости принимаются решения об изменении скорости обучения различных нейронов выходного слоя НС.

Во-первых, если для перехода, меньшего 200 градусов, указанное соотношение составляет менее 17, то изменение температуры идет слишком быстро, в связи с чем, необходимо инвертировать значение скорости обучения нейрона выходного слоя ( $\eta_1=-0.00004$ ), отвечающего за формирование коэффициента  $K_p$ , тем самым будет уменьшено его абсолютное значение.

Во-вторых, если для перехода, меньшего 200 градусов, указанное соотношение составляет более 150, то изменение температуры идет слишком медленно, в связи с чем, необходимо увеличить значение скорости обучения нейрона выходного слоя ( $\eta_1=0.001$ ), отвечающего за формирование коэффициента  $K_p$ , тем самым будет увеличено его абсолютное значение.

После внесения данных изменений проделанный эксперимент был проведен повторно. Его результаты приведены на рис.3.



*Рис. 3. Выход ОУ, управляемого регулятором с нейросетевым оптимизатором и ПИД-регулятором при обратном переходе с модели  $K=20$ ,  $T_1=5500$  с,  $T_2=41$  с,  $\tau=90$  с на модель пустой печи*

Данные графики позволяют сделать следующие выводы. ПИД-регулятор отработал как и в предыдущем опыте. А система с надстройкой на первом переходном процессе после смены ОУ показала перерегулирование в 10%, а затем начала работать с перерегулированием в 5%. Более того, при работе на модели объекта  $K=20$ ,  $T_1=5500$  с,  $T_2=41$  с,  $\tau=90$  с регулятор с нейронадстройкой позволял экономить 2000 секунд на каждом переходном процессе.

### **Выводы**

Эвристики, добавленные в алгоритм работы НС надстройки, позволили улучшить качество переходных процессов и уменьшить перерегулирование более чем 4 раза при первом изменении задания после смены ОУ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-07-00252/12.

### **Список литературы**

1. Omatu S., Khalid M., Yusof R. Neuro-Control and its Applications. - London: Springer, 1995. – 255 p.
2. Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И. Об особенностях практической реализации схемы пид-нейрорегулятора с самонастройкой для управления печами нагрева // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2012. - №1. – С.25-30.

## **РАЗРАБОТКА НЕЙРОЭКСПЕРТНОГО ТРЕНАЖЕРА ОПЕРАТОРА ШАХТНОЙ ПЕЧИ**

### **Аннотация**

В работе обосновывается целесообразность построения нейроэкспертного тренажера оператора шахтной печи, предлагается его структурная схема и функционал основных подсистем: нейросетевой модели технологического процесса и экспертного модуля формализации и обучения.

### **Введение**

Постоянный рост требований к качеству продукции и уровня автоматизации современных металлургических производств предполагают повышение уровня профессиональной подготовки кадров предприятий отрасли. Согласно статистическим данным большинство аварий на металлургических предприятиях происходит по причине ошибок персонала, задействованного в управлении сложными технологическими объектами, наличия, так называемого, человеческого фактора. Кроме того, ввиду значительной энерго- и ресурсоемкости металлургического производства удаление технологического процесса от наилучшей рабочей траектории ввиду неоптимальных действий оператора зачастую приводит к существенным экономическим потерям. В результате безопасность и эффективность функционирования технологического агрегата в значительной степени определяется квалификацией оперативного персонала.

В таких условиях особую актуальность приобретает задача разработки эффективных методов обучения и контроля знаний оператора и уровня его квалификации и, соответственно, его пригодности для управления технологическим процессом (ТП).

Поставленную задачу предлагается решать посредством разработки тренажера [1], т.е. системы обучения и контроля знаний, которая позволит оператору в короткие сроки получить практический навык управления реальным ТП на базе его модели, а руководству предприятия оценить профпригодность оператора.

В качестве объекта моделирования в рамках проводимого исследования выбран сложный, нелинейный, многосвязный и нестационарный технологический агрегат – металлургическая шахтная печь (ШП), в которой протекают сложные физико-химические процессы, требующие высокой степени подготовки оперативного персонала, необходимой для обеспечения правильности и своевременности принимаемых управленческих решений. Из-за сложности ШП как объекта управления на оперативный персонал накладывается весьма широкий спектр задач. К числу основных задач оператора относятся:

- раннее распознавание и четкая отработка нештатных ситуаций (быстрый перевод ШП в штатный режим, недопущение развития аварии);
- предотвращение перехода объекта в нештатные (опасные) режимы функционирования;
- управление ШП в штатном режиме близкое к оптимальному с целью минимизации себестоимости (ресурсо- и энергозатрат на единицу продукции), максимизации прибыли или производительности агрегата при технологических ограничениях и ограничениях на качество готового продукта.

Задача оптимального управления, на сегодняшний день, является наиболее сложной. Связано это с тем, что для её решения требуется наличие точной математической модели процесса, функционирующей в режиме реального времени. Получить подобную модель ШП не представляется возможным ввиду отмеченных выше сложности, нелинейности, многосвязности и нестационарности печи как объекта управления [3]. Обработка аварийных и предаварийных ситуаций в высокой точности модели объекта не нуждается, поскольку в этом случае от оператора требуется лишь знание и строгое выполнение точной, ранее определенной последовательности действий.

### **Нейросетевая модель обучения оператора ШП**

Интеллектуальные системы вообще и нейронные сети в частности в настоящее время признаны перспективным направлением моделирования сложных, нелинейных объектов управления, какими и являются ШП. Теория этих систем и ее приложения отражены в трудах ведущих ученых, таких как Д.А. Поспелов, И.М. Макаров, В.М. Лохин, К.А. Пупков, В.Г. Коньков, *Y.-Z. Lu*, *K.M. Hangos*, *S. Omatu*.

Для построения нейросетевой модели целесообразно воспользоваться ретроспективной информацией, содержащейся в архивах SCADA-системы [2], в которых накапливается история основных технологических параметров и соответствующих действий оператора с частотой дискретизации, удовлетворяющей требованиям ТП.

После первичной обработки ретроспективных данных (рис. 1) и формирования необходимой совокупности выборок, предназначенных для обучения и тестирования нейронной сети, осуществляется выбор её исходной структуры. После обучения нейронная сеть подвергается тестированию, по результатам которого принимается решение о её оптимизации. Проведенные исследования демонстрируют возможность в результате многократных улучшений получения нейронной сети, обеспечивающей необходимую точность воспроизведения параметров реального процесса. На её основе и формируется нейросетевая модель ШП.

Полученная модель позволит будущему оператору обучаться в условиях, максимально приближенных к работе реального объекта, не отвлекая от производства основной персонал предприятия и не подвергая опасности технологический агрегат.

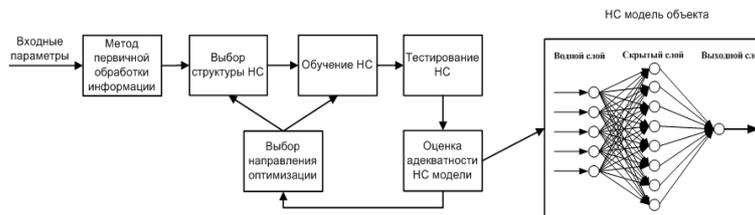


Рис. 1. Стадии построения нейросетевой модели ШП

Необходимо отметить, что адекватность модели в полной мере обеспечивается только для штатных режимов функционирования объекта. Объясняется это практически полным отсутствием в исходной ретроспективной выборке данных о работе объекта в нештатных режимах. Более того, для повышения сходимости модели целесообразно полностью исключить такие данные на этапе первичной обработки.

По этой причине для решения задач обучения методам распознавания и отработки нештатных ситуаций, а также предотвращения перехода объекта в нештатные режимы функционирования предлагается в связке с нейросетевой моделью использовать экспертные системы (ЭС). Экспертная система может сохранять опыт эксперта (опытного оператора ШП), распознавать возникающие ситуации и предлагать обучаемому подсказки в случае его ошибочных действий.

### Нейроэкспертный тренажер оператора шахтной печи

Структурная схема нейроэкспертного тренажера представлена на рис. 2. В данной схеме ЭС используется для решения задач распознавания нештатных ситуаций, формализации знаний, объяснения сложившихся на объекте ситуаций и оценки квалификации оперативного персонала [4].

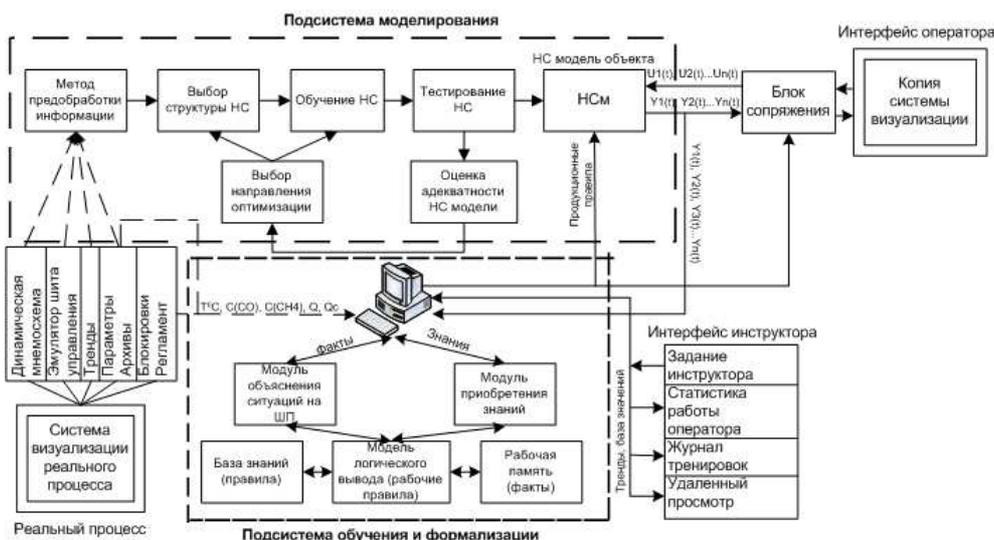


Рис. 2. Структура нейроэкспертного тренажера оператора ШП

В ЭС передаются все ограничения и блокировки процесса, что позволяет ей оперативно отслеживать режимы функционирования объекта и при необходимости вмешиваться в работу, предлагая оператору объяснение сложившейся ситуации.

Первоначально при проектировании тренажера эксперт в основу системы закладывает набор фактов о ТП (рабочая память), оперируя которыми ЭС формирует посредством модуля логического вывода необходимые решения по текущей ситуации. Все решения приводятся к обобщенной структуре продукционных правил *IF-THEN*. Кроме того в продукционную систему должны поступать факты реального времени – выходы нейросетевой модели. В результате работы ЭС с предложенными данными формируются дерево решений и советы оператору (тренажер в режиме обучения). По окончании тренировки или экзамена ЭС выдает отчет, в виде трендов и оценок действий обучаемого оператора. Проанализировав полученные сведения, инструктор принимает решение об уровне квалификации обучаемого и его пригодности к управлению реальным ТП.

### **Заключение**

Предлагаемый нейроэкспертный тренажер может быть использован как универсальная обучающая система, обеспечивающая формирование необходимых навыков оператора по управлению объектом в различных режимах его функционирования (штатных и нештатных) в условиях, максимально приближенных к работе реального объекта, и система оценки уровня квалификации оператора ШП, его подготовленности к самостоятельной работе. Кроме того, возможно применение экспертной подсистемы тренажера в качестве системы-советчика оператора, управляющего реальным объектом.

### **Список литературы**

1. Еременко Ю.И., Халапян С.Ю., Ярмуратий Д.Ю. Актуальность разработки тренажера оператора шахтной печи/Проблемы автоматизации регионального управления связь и автоматика (Паруса 2012). Геленджик – 2012. – С. 79-83.
2. Еременко Ю.И., Халапян С.Ю., Ярмуратий Д.Ю., Исследование возможности разработки нейросетевого тренажера оператора АСУ ТП. Материалы 9 Всероссийской школы-конференции молодых ученых. ИПУ РАН(2012). Липецк, 2012, с 45-47.
3. Котелева Н.И. Усовершенствование системы управления процессом обжига известняка в печах шахтного типа//Записки Горного Института. Полезные ископаемые России и их освоение. СПГГИ(ТУ), Санкт-Петербург, 2010. Т.186, с. 181-184.
4. Кулаков С.М. Разработка интеллектуальной системы автоматического управления тепловым режимом воздухонагревателей /С.М. Кулаков, В.Б. Трофимов// Научный вестник НГТУ. - 2008. - № 3. - С. 3 - 12.

## ПОСТРОЕНИЕ И НАСТРОЙКА ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ НЕЙРОНЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВАРКИ САХАРА

### Аннотация

В работе рассматриваются нейронечеткие переключаемые системы и их применение к моделированию процесса варки сахара. Предлагается новый тип функций принадлежности для нейронечеткой системы, позволяющий снизить размерность оптимизационной задачи при ее обучении.

### Введение

Нечеткие модели с переключениями, появившиеся в 90-х годах прошлого века, представляют собой синтез переключаемых систем и нечетких моделей. К их преимуществам относят более точное (по сравнению с классическими нечеткими моделями) описание сложных реальных систем, в которых сочетаются непрерывные и дискретные процессы [3].

В данной работе будет рассмотрена нейронечеткая система с переключением и ее применение к моделированию процесса варки сахара.

### Методы исследования. Нечеткие и нейронечеткие модели

Переключаемую нечеткую Такаги-Сугено (TS) модель можно описать совокупностью правил вида:

$$R_{\sigma}^l: \text{If } u_1 \text{ is } A_{\sigma 1}^l, \dots \text{ and } u_m \text{ is } A_{\sigma m}^l, \text{ then } y = \mathbf{a}_{\sigma}^l \mathbf{u}^T + b_{\sigma}^l. \quad (1)$$

Здесь  $l = 1, \dots, N_{\sigma}$  – количество правил в каждой подмодели,  $A_{\sigma i}^l$  – входные нечеткие множества,  $\mathbf{a}_{\sigma}^l = \{a_{\sigma 1}^l, \dots, a_{\sigma m}^l\}$ ,  $b_{\sigma}^l$  – параметры заключений правил,  $\mathbf{u} = \{u_1, \dots, u_m\}$  – входы,  $\sigma \in S = \{1, 2, \dots, s\}$  – переключающий сигнал.

Выход TS-модели с переключением задается следующей формулой:

$$y = \sum_{l=1}^{N_{\sigma}} \alpha_{\sigma}^l (a_{\sigma}^l \mathbf{u}^T + b_{\sigma}^l) / \sum_{l=1}^{N_{\sigma}} \alpha_{\sigma}^l \quad (2). \quad \text{Истинность предпосылки определяется так:}$$

$$\alpha_{\sigma}^l = \prod_{i=1}^m \mu_{\sigma i}^l, \quad \text{где } \mu_{\sigma i}^l \text{ – функция принадлежности нечеткого множества } A_{\sigma i}^l.$$

В отличие от нечеткой модели, параметры которой исследователь подбирает сам, для нейронечеткой системы (ННС) параметры подбираются минимизацией интегральной функции ошибки  $E$  на множестве данных. Самый распространенный тип ННС – ANFIS [2].

Переключаемая ННС типа ANFIS, как и нечеткая переключаемая TS-модель, имеет базу правил вида (1). Реализуемая такой переключаемой ANFIS-системой функция имеет вид (2).

Большими возможностями обладают нечеткие и нейронечеткие модели с расширенным набором предпосылок, правила которых имеют вид:

$$R^l : \text{If } u_1(t) \text{ is } A_{11}^l, \dots \text{ and } u_m(t-n+1) \text{ is } A_{mn}^l, \text{ then } y = a^l U b^l + c^l. \quad (3)$$

Здесь  $y \in R^1$  – выход системы;  $a^l \in R^{1 \times m}$ ,  $b^l \in R^{n \times 1}$ ,  $c^l \in R^1$  – параметры заключений правил. Матрица  $U = [u_1, \dots, u_m]^T \in R^{m \times n}$  составлена из аргументов предпосылок правил; здесь  $u_i = [u_i(t), \dots, u_i(t-n+1)]$  – значения входа  $u_i$  за ряд последовательных моментов времени. Добавив в базу (3) переключающий сигнал  $\sigma$ , можно перейти к нечеткой или нейронечеткой модели с переключением.

Такие модели учитывают динамику входных значений. Модели с правилами (3), но разностные, упоминаются, например в [1].

Модель (3) обладает достоинствами, среди которых основным является возможность учитывать большее количество информации о моделируемой системе. Однако большое количество входов приводит к необходимости задания большего числа нечетких множеств  $A_{ij}^l$ . В модели (3) требуется задать набор нечетких множеств для каждого элемента  $u_i(t-j+1)$  входной матрицы  $U \in R^{m \times n}$ . Нейронечеткую модель с базой правил (3) сложнее обучить по сравнению с моделью (1).

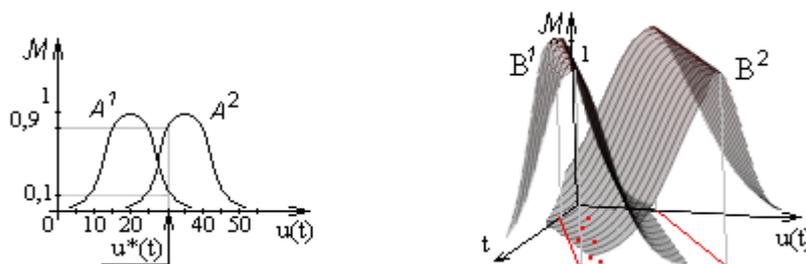


Рис. 1. Стандартная гауссовская функция принадлежности и предлагаемая трехмерная функция принадлежности (ФП)

Для снижения числа настраиваемых параметров модели (3) предлагается использовать трехмерные гауссовские ФП. Такая ФП фазифицирует не одно входное значение  $u_i(t-j+1)$ , а сразу вектор  $u_i = [u_i(t), \dots, u_i(t-n+1)]$ , оценивая его близость к центру нечеткого множества  $B_i^l$  (рис. 1 справа). Степень принадлежности вектора  $u_i$  нечеткому множеству  $B_i^l$  вычисляется по формуле:

$$\mu_i^l = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \exp \left[ -\frac{1}{h_i^l} \left( (t-j+1) + \frac{g_{1i}^l - u_i(t-j+1)}{g_{0i}^l} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Из формулы видно, что у предложенного нечеткого множества  $B_i^l$  три параметра:  $g_{0i}^l$  и  $g_{1i}^l$  – параметры прямой, определяющей центр множества,  $h_i^l$  – параметр, определяющий ширину нечеткого множества.

В случае использования множеств со степенью принадлежности, определяемой по формуле (4), упростится идентификация нечеткой модели или ННС – для нее понадобится задать уже не  $m \cdot n$ , а  $m$  наборов нечетких множеств.

С учетом того, что у предложенных ФП на один параметр больше, чем у гауссовских, число настраиваемых параметров снизится в  $2n/3$  раз.

Правила модели (3) в случае использования ФП  $B_i^l$  имеют вид:

$$R^l : \text{If } u_1 \text{ is } B_1^l, \dots \text{ and } u_m \text{ is } B_m^l \text{ then } y = a^l U b^l + c^l. \quad (5)$$

Здесь  $u_i \in R^{1 \times n}$  – входные векторы,  $y \in R^1$  – выход. Видно, что по сравнению с базой правил (3) функций принадлежности требуется меньше.

Предложенные ФП можно использовать и в сочетании с переключающимися моделями. База правил для ННС или нечеткой модели с переключением имеет вид:

$$R_\sigma^l : \text{If } u_1 \text{ is } B_{\sigma 1}^l, \dots \text{ and } u_m \text{ is } B_{\sigma m}^l \text{ then } y = a_\sigma^l U b_\sigma^l + c_\sigma^l. \quad (6)$$

Функции выхода для моделей (5) и (6) определяются аналогично функции для модели (1). Моделью с базой правил (6) была описана варка сахара.

Стандартный для ННС метод настройки – когда из условия минимизации функции ошибки  $E$  подбираются значения параметров – зачастую дает не очень хорошие результаты, особенно в случаях большого количества входов модели. Следует отметить то, что при таком способе настройки подбираются в первую очередь параметры заключений правил, а параметры ФП  $B_i^l$  или  $A_{ij}^l$  в предпосылках остаются равными заданным на нулевом шаге алгоритма начальным значениям. Это происходит из-за особенностей функции выхода нейронечеткой модели (2), которая входит в ошибку  $E$ . Параметры заключений правил модели входят в функцию (2) линейно и настраиваются в первую очередь. Параметры предпосылок входят в функцию (2) нелинейно (в составе функции  $\alpha_\sigma^l$ ), и поэтому практически не меняются в процессе обучения. Для повышения точности настройки можно использовать двухэтапный альтернативный способ, заключающийся в отдельной настройке заключений и предпосылок. Для настройки предпосылок предлагается алгоритм, основанный на анализе обучающего множества и МНК. С его помощью определяются параметры трехмерных ФП  $B_i^l$ . Затем стандартным способом подбираются параметры заключений.

### **Применение ННС к моделированию варки. Результаты исследования**

Важную роль в производстве сахара играет варка сахарного сиропа. Основным параметром, определяющим ход процесса, является плотность сиропа  $D$ , которая должна изменяться определенным образом. В свою очередь нужная плотность  $D$  достигается благодаря сочетанию других трех параметров, изменяемых регулирующими устройствами (клапанами): уровнем сиропа  $L$ , вакуумом  $V$  и давлением пара  $P$ . Параметры  $L$ ,  $V$ ,  $P$  регулируются в соответствии с графиками, представляющими собой ломаные линии, вид которых определяется несколькими «контрольными точками» (КТ). Оператор задает КТ так, чтобы параметры  $L$ ,  $V$ ,  $P$ , и, как следствие, параметр  $D$ , прошли по нужным траекториям.

Так как неопытный оператор может ошибаться в определении КТ, требуется разработать программу, которая, опираясь на снятые датчиками значения

параметров, рекомендовала бы значения КТ. Для решения такой задачи удобно использовать средства нейронечеткого моделирования. Заметим, что в распоряжении автора есть данные по варке за сезон 2009 г., из которых для ННС можно сформировать обучающее множество.

Параметры варки связаны на разных этапах разными зависимостями, поэтому целесообразно ввести в ННС переключения, и поставить в соответствие каждому этапу ANFIS-подмодель.

Ход, результат процесса варки и контрольные точки зависят не только от конкретных значений  $L$ ,  $V$  и  $P$ , но и от скорости их изменения. Динамику параметров варки легко учесть, используя нейронечеткую модель с расширенным входом (б).

База правил переключающейся ННС, определяющей КТ для  $D$  по значениям трех параметров варки, имеет вид:

$$R_{\sigma}^l : \text{If } u_1 \text{ is } B_{\sigma 1}^l, \dots \text{ and } u_3 \text{ is } B_{\sigma 3}^l \text{ then } y = a_{\sigma}^l U b_{\sigma}^l + c_{\sigma}^l.$$

Здесь  $u_i = [u_i(t), \dots, u_i(t-14)]$  – значения  $i$ -го параметра за 15 последовательных моментов времени,  $\sigma \in S = \{1, \dots, 4\}$  – переключающий сигнал, определяющий подмодель, соответствующую этапу варки (было выделено 4 этапа),  $y$  – значение КТ.  $B_{\sigma i}^l$  – предложенные трехмерные ФП, благодаря которым количество параметров сократилось в 10 раз.

Переключаемая ННС была запрограммирована в MATLAB. Отклонения модельных значений КТ от реальных на тестовом множестве не превышали 2%. Для подтверждения адекватности был вычислен коэффициент детерминации  $R^2 = 0,967$ . Высокое значение говорит о достоверности построенной модели.

### **Заключение**

Приведенные результаты подтверждают возможность использования переключающейся ННС: значения КТ для плотности, полученные на ее выходе, мало отличаются от значений КТ контрольных точек, выставленных оператором. При этом предложенные трехмерные ФП (4) упрощают процесс обучения модели. Двухэтапный алгоритм обучения делает возможной более точную настройку модели.

### **Список литературы**

1. Кудинов Ю.И., Келина А.Ю., Сулова С.А. Построение и идентификация нечеткой модели многосвязного объекта // Вести ВУЗов Черноземья. – Липецк: ЛГТУ. – 2005. – №5. – С. 35-39.
2. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: Бином, 2009. – 800 с.
3. Yang H., Dimirovski G. M., Zhao J. Switched Fuzzy Systems: representation modeling, stability analysis, and control design // Proc. of the third International IEEE Conference on Intelligent Systems. London, 2006. P. 306-311.

## **УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНЫМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ АЛГОРИТМАМИ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ АВИАЦИОННОГО ГТД В УСЛОВИЯХ БОРТОВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ**

### **Аннотация**

Рассмотрено применение интеллектуальных алгоритмов для решения задач контроля и диагностики авиационного ГТД таких как реализация математической модели двигателя и диагностика отказов датчиков, описан подход к построению как чисто нейросетевых так и нейро-нечетких моделей, отражены их достоинства и недостатки.

### **Введение**

С развитием авиационных газотурбинных двигателей, непрерывно развиваются и усложняются системы их регулирования, контроля и диагностики. Достижение безотказности и точности таких систем напрямую влияет на эксплуатационные параметры двигателей и безопасность полетов. В настоящее время получили распространение цифровые электронные системы управления двигателем с полной ответственностью (*FADEC*). Решение задач контроля и диагностики ГТД в условиях бортовой реализации требует большого объема вычислений в реальном времени, при ограниченных вычислительных ресурсах. Кроме того, отличительной чертой бортовых систем является их функционирование в условиях так называемых не-факторов (неполнота измеряемой информации, шумы измерений, наличие конструктивной, параметрической и экспертной неопределенности при оценке параметров ГТД). Это вызывает необходимость дополнять имеющиеся классические методы новыми интеллектуальными.

### **Постановка задачи**

В настоящее время наряду с использованием интеллектуальных методов одного типа, например, нейронных сетей, представляют интерес гибридные интеллектуальные алгоритмы, реализованные комбинированием различных интеллектуальных методов[1].

Основными блоками электронной системы управления двигателем, построенной по принципу *FADEC* являются блок контроля измеряемых параметров (БКИП), бортовая система контроля и диагностики (БСКД) и система автоматического управления (САУ). В связи с тем, что не исключен полный или частичный отказ датчиков газотурбинного двигателя, информация с них проходит первичную обработку в БКИП, в ходе которой проверяется достоверность данной информации и диагностируется возможный отказ датчиков. Данные, прошедшие обработку и верификацию, подаются на вход блоков БСКД и САУ. Блок БСКД на основе измеренных параметров выдает

заключение о состоянии двигателя. Блок САУ решает задачу автоматического управления двигателем, выдавая управляющие воздействия на исполнительные механизмы ГТД на основе измеренных параметров и заданных уставок управления.

### **Реализация ММ ГТД на основе технологии нейронных сетей**

В настоящее время для первичной обработки информации с датчиков используются алгоритмы допускового контроля параметров по амплитуде и ее производной. Такой метод имеет недостаточную эффективность обнаружения постепенного отказа датчика или информационного канала. В случае обнаружения отказа датчика для восстановления потерянной информации используется последнее достоверное значение параметра, хранящееся в памяти БКИП. Но такой метод эффективен только при неизменном режиме работы ГТД, при смене режима погрешность восстановления информации значительно возрастает.

Одним из путей повышения эффективности работы БКИП является включение в его состав математической модели (ММ) газотурбинного двигателя, которая моделирует работу последнего на всех режимах на основании управляющих воздействий и данных измерения внешних параметров. Такая модель служит еще одним измерительным каналом ГТД, расчетные выходные параметры модели могут быть использованы для диагностики отказов датчиков а также нештатных режимов работы двигателя на основании сравнения вышеуказанных параметров с измеренными, и для восстановления потерянных данных с датчиков в случае обнаружения их отказа. Такая модель должна обладать рядом специальных свойств, важнейшими из которых являются следующие [6]:

1. Модель должна описывать свойства ГТД, определяющие нестационарность рабочих процессов, что означает необходимость использования динамической модели.

2. Структура математической модели ГТД должна обеспечить практическую возможность ее функционирования в комплексе с математическими моделями других элементов летательного аппарата.

3. Математическая модель ГТД как объекта регулирования должна адекватно имитировать переходные режимы работы двигателя.

Одним из перспективных направлений в данной области является создание ММ ГТД на основе технологии нейронных сетей, важными свойствами которых является способность к обучению, дообучению и обобщению накопленных знаний, что дает возможность подстраивать параметры модели под особенности конкретного экземпляра двигателя в наземных либо бортовых условиях на основе накопленной информации. Вышеуказанным требованиям отвечают сети Элмана и рекуррентные многослойные персептроны (*NARX*)[5]. На рис. 1 показана структура прямой нейросетевой модели газотурбинного двигателя, на основе многослойного рекуррентного персептрона [3].

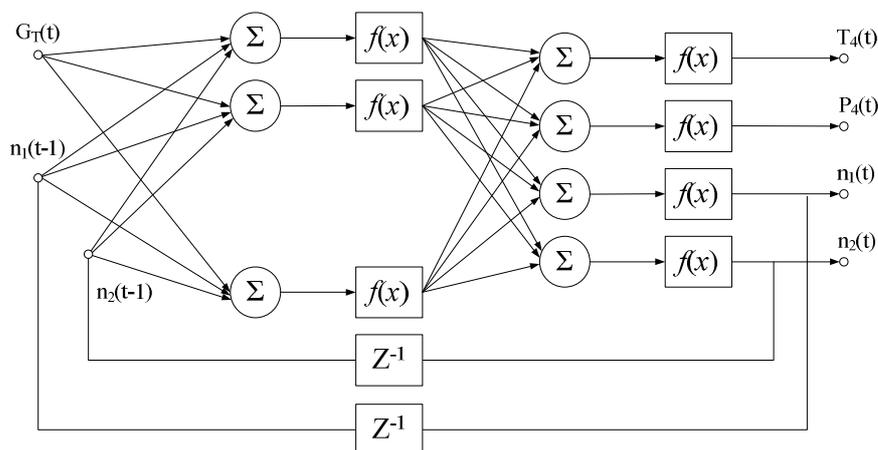


Рис. 1. Структурная схема применяемого нейросетевого алгоритма

### Диагностика отказа датчиков ГТД с использованием гибридных нейро-нечетких алгоритмов

Наряду с разработкой ММ ГТД стоит задача повышения эффективности алгоритмов обнаружения отказов датчиков, реализуемых в блоке БКИД. Для решения данной задачи также планируется использовать интеллектуальные алгоритмы, а именно гибридные нейро-нечеткие классификаторы [2]. Нейронные сети обладают способностью к обучению и адаптации, и для их проектирования не требуются полные знания об объекте управления, но их структура слабо связана с существующими в объекте закономерностями. Системы с нечеткой логикой не имеют данного недостатка, но для их создания уже на этапе проектирования управляющих модулей необходимы знания об объекте управления, что означает отсутствие возможности обучения таких систем. Гибридные алгоритмы же лишены вышеуказанных недостатков и сочетают в себе вычислительные возможности и способность к обучению нейронных сетей так и свойственные человеческому мышлению правила выработки решений свойственные нечеткой логике [4].

Структурная схема нейро-нечеткой сети изображена на рис. 2. Элементы слоя 1 реализуют функции принадлежности нечеткого множества  $A_j^k$ , на его выходе формируются значения данной функции для входных сигналов  $x_i$ . Конфигурация связей слоя 2 соответствует базе правил, а мультипликаторы – блоку вывода. Слои 3 и 4 являются реализацией блока дефаззификации. В отличие от классических нейронных сетей, все структурные связи и элементы данной сети имеют физическую интерпретацию. Таким образом, исключается необходимость экспериментального подбора оптимальной структуры нейронной сети. Обучение данной нейро-нечеткой сети ведется аналогично обучению обычной нейронной сети с прямым распространением сигнала.

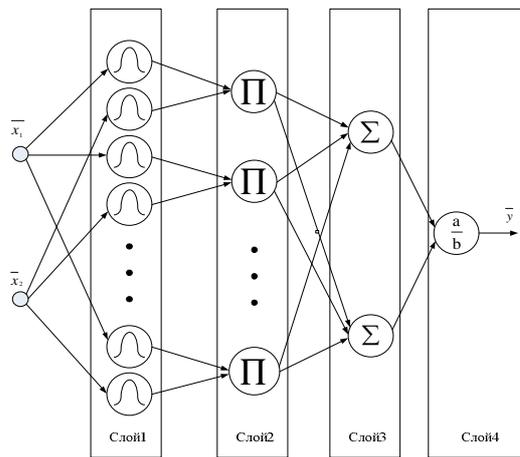


Рис. 2. Структурная схема нейро-нечеткой сети

### Заключение

Повышение эффективности диагностики отказов датчиков авиационного ГТД может быть осуществлено с использованием интеллектуальных методов, как нейросетевых так и гибридных нейро-нечетких. Основными преимуществами таких методов являются простота обучения и дообучения применяемых моделей и классификаторов, возможность повышения производительности и отказоустойчивости вычислительных алгоритмов за счет применения параллельных вычислений, достаточная точность вычислений в вышеописанных условиях «не-факторов».

### Список литературы

1. Васильев В.И., Жернаков С.В., Фрид А.И. и др. Нейрокомпьютеры в авиации (самолеты) / Под ред. Васильева В.И., Ильясова Б.Г., Кусимова С.Т. Кн. 14: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003. – 496 с.
2. К вопросу о построении гибридных нейро-нечетких экспертных систем диагностики и контроля ГТД. Текст./ Жернаков С.В.// Управление в сложных системах. Уфа: УГАТУ, 1999. С.119-126.
3. Об одном подходе к оценке производительности сигнального процессора и штатного микроконтроллера в условиях бортовой реализации/ Гильманшин А.Т.// 6-я Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых: Актуальные проблемы в науке и технике. Уфа: УГАТУ, 2011. Т. 1. С. 171-175.
4. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452с.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. – М: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
6. Чуян Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА, ХРАНЕНИЯ, ТРАНСПОРТА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

### Аннотация

В докладе рассматривается постановка и методы решения задачи планирования производства, транспортировки, складирования и распределения нефти и нефтепродуктов в товаропроводящей сети.

Приводится экономико-математическая модель задачи, методика ее деагрегирования на подзадачи более простой структуры, алгоритмы решения составляющих задач.

Для решения задачи разработана компьютерная система, позволяющая получать решения исходной задачи и ряда других промежуточных подзадач. [1].

### Основные обозначения

Пусть  $G = \langle E, V, H \rangle$  – связный конечный ориентированный граф,  $E$  – множество вершин графа,  $V$  – множество дуг,  $H$  – отображение  $H: V \rightarrow E \times E$ . Каждой дуге  $v \in V$  отображение  $H$  ставит в соответствие упорядоченную пару  $(h1(v), h2(v))$  вершин из  $E$ ,  $h1(v)$  – начало дуги  $v$ ,  $h2(v)$  – конец. Множество дуг, входящих в вершину  $i$ , обозначим через  $V^+(i)$ , множество дуг, выходящих из вершины  $i$ , обозначим через  $V^-(i)$ .

### Описание системы

Нефть (сырье для производства н/п) от нефтяных месторождений по системе транспорта нефти поступает: а) конечным потребителям сырой нефти, б) на нефтеперерабатывающие заводы. На нефтеперерабатывающих заводах из сырой нефти получают (в соответствии с заданными пропорциями) различные виды нефтепродуктов, которые транспортируются по различным сетям. Пусть  $s$  переменная соответствует  $s$ -ому виду продукта, транспортируемого в сети, пусть значению  $s=0$  соответствует сырая нефть,  $s=1, 2, 3, \dots, m$  соответствуют различные виды продуктов нефтепереработки.

### Пространственно технологический граф продукта

Для  $s=0, 1, 2, \dots, m$  поставим в соответствие конечный ориентированный граф  $G_s = \langle E_s, V_s, H_s \rangle$ , описывающий структуру его транспорта,  $E_s$  – множество его вершин графа,  $V_s$  – множество дуг,  $H_s$  – отображение  $H_s: V_s \rightarrow E_s \times E_s$ ,  $E_s \cap E_{s1} = \emptyset$ ,  $V_s \cap V_{s1} = \emptyset$ , при  $s \neq s1$ . Вершинам графа  $G_0 = \langle E_0, V_0, H_0 \rangle$  соответствуют источники – нефтяные месторождения, перевальные точки (места

слияния потоков) потребители двух видов: конечные потребители, НПЗ. Для графов  $s=1,2,3,\dots,m$  вершинами – источниками являются места выхода соответствующего продукта из НПЗ. Остальные вершины соответствуют конечным потребителям данного продукта, промежуточным точками.

Через  $G=\langle E, V, H \rangle$  обозначим граф, получаемый объединением графов  $G_s$ , Этот граф состоит из  $m+1$  компонент, можно считать, что этот граф имеет два уровня иерархии,  $G_0$  – нулевой (верхний) уровень,  $G=\cup\{G_s/s=1,2,3,\dots,m\}$  – первый (нижний) уровень. Нулевой уровень обеспечивает функционирование первого уровня.

### Пространственно временной граф

Так как система функционирует во времени, то можно построить пространственно–временной граф, который будет отражать также временной фактор. Будем считать, что рассматриваемая система функционирует в дискретном времени  $t, t=0,1,2,\dots,T$ , где  $T$  - горизонт планирования, непрерывное время  $(t, t+1)$  будем относить к моменту  $t+1$ . Каждому периоду  $t=1,2,\dots,T$ , соответствует свой пространственно–технологический граф. Для момента времени  $t=0$  и  $t=T+1$  введем только вершины множества  $E$ . Одноименные вершины разных моментов времени соединим между собой дополнительными дугами. Это дуги соответствуют емкостям, через которые продукт из одного временного графа переходит в другой временной граф.

В дальнейшем будем считать, что все построения выполнены и в их результате получен граф  $G=\langle E, V, H \rangle$ . Так как имеются дуги, соответствующие транспорту потока и временному переходу, то в дальнейшем первые будем обозначать  $V^{mp}$ , вторые  $V^{ep}$ . Аналогично будем отличать вершины, соответствующие моменту времени  $t=0$  и  $t=T+1$ , их множество обозначим  $E^{t=0}$ , остальные  $E^{t=T+1}$ .

### Модели потребления сырой нефти и нефтепродуктов

Для всех потребителей, как сырой нефти, так и нефтепродуктов ( $i \in E \setminus (E^{t=0} \cup E^{t=T})$ ), строится зависимость выручки  $W_i = W_i(\xi_i)$  от объема потребления  $\xi_i$ . Это построение аналогично построению функции спроса на основе резервной цены. В ней также учитывается приоритет потребителей по отпуску нефтепродуктов. Она является неубывающей, непрерывной кусочно-линейной.

### Модель добычи сырой нефти

Пусть вершина  $i$  графа, соответствующая нефтяному месторождению,  $\eta_i$  объем отгрузки производства сырой нефти в ней и соответственно  $P\eta_i$  стоимость его добычи. Затраты на добычу этого объема нефти составляют  $W\eta_i = P\eta_i \times \eta_i$ , ограничения  $0 \leq \eta_i \leq \bar{\eta}_i$ , где  $\bar{\eta}_i$  максимальный объем добычи.

### Переработка нефти на НПЗ

Пусть  $i$  вершина графа, соответствующая НПЗ. Обозначим через  $\eta_i$  объем нефти, поступающей из графа  $G_0$ . Ясно, что  $\eta_i = \sum\{y_{h2(v)} : v \in V^+(i)\}$ , где  $y_{h2(v)}$  объ-

ем нефти в конце дуги  $v \in V^+(i)$ . В результате переработки нефти получается  $m$  видов продукции; если  $\eta_i^s$  количество получаемого нефтепродукта  $s$ -го вида, то  $\eta_i^s = \alpha_i^s \times \eta_i$ ,  $s=0,1,2,3,\dots,m$ , где  $\alpha_i^s$  количество нефтепродукта  $s$ -го вида, получаемого из единицы объема нефти. Затраты на переработку нефти зависят от объема  $y_{h2(v)}$  и цены  $P_{y_{h2(v)}}$ ,  $v \in V^+(i)$ , входящей нефти, объемов получаемых продуктов, а также от объемов затрачиваемых факторов производства, поэтому можно записать  $W\eta_i = W\eta_i(y_{h2(v)}, P_{y_{h2(v)}}, v \in V^+(i); \alpha_i^s, \eta_i^s, s=1,2,3,\dots,m; r_i)$

### **Транспорт продуктов, потери**

Пусть  $v \in V$  любая дуга графа  $G$ , соответствующая транспорту,  $y_{h1(v)}$  - величина потока, который поступил в дугу  $v$ ,  $y_{h2(v)}$ , который вышел из этой дуги,  $y_{h2(v)} \neq y_{h1(v)}$  из-за потер. Транспорт нефтепродукта осуществляют различного вида транспортные средства, которые и определяют вход с выходом  $y_{h2(v)} = f_v(y_{h1(v)}, r_v)$ ,  $0_v \leq r_v \leq \bar{r}_v$ , где  $f_v(y_{h1(v)}, r_v)$  производственная функция,  $r_v$  - вектор факторов производства (объем фондов, численность трудящихся, занятых в производственном процессе,...),  $\bar{r}_v$  - вектор предельных объемов факторов,  $r_v > 0_v$ . Издержки на транспорт продукта можно записать в виде  $S_v = \langle r_v, Pr_v \rangle$ , где  $Pr_v$  стоимость факторов производства.

### **Хранение продуктов в емкостях**

$W_v = P_{y_v} \times y_v$  - затраты на хранение  $v \in V^{sp}$ , при ограничении  $0 \leq L_v \leq y_v \leq U_v$ ,  $v \in V^{sp}$ , где  $L_v$  - страховой запас,  $U_v$  - максимальный рабочий объем емкостей,  $W_v$ .

### **О методах решения задачи**

Для каждого продукта  $s=0,1,2,3,\dots,m$  в отдельности задача представляется в виде обобщенной сетевой транспортной задаче с ограниченными пропускными способностями. Эффективным методом ее решения является алгоритм дефекта [2]. Для узлов графа, соответствующих НПЗ, осуществляется стыковка решений в соответствии с задаваемыми коэффициентами. Этот подход позволил решать задачи большой размерности, охватывающей большую часть нефтяной отрасли России.

### **Система планирования производства, хранения, транспортировки и распределения нефти и нефтепродуктов (СППХТН)**

Описанные модели и методы их решения реализованы в СППХТН. Применение системы позволяет выбрать наиболее эффективные процессы переработки нефти на НПЗ с определением объемов переработки нефти, определить динамику объемов хранения нефтепродуктов различного типа на нефтебазах, выбрать наиболее рациональные способы транспортировки нефтепродуктов потребителям различными видами транспорта в динамике. На рис. 1 представлена схема поставок дизтоплива.

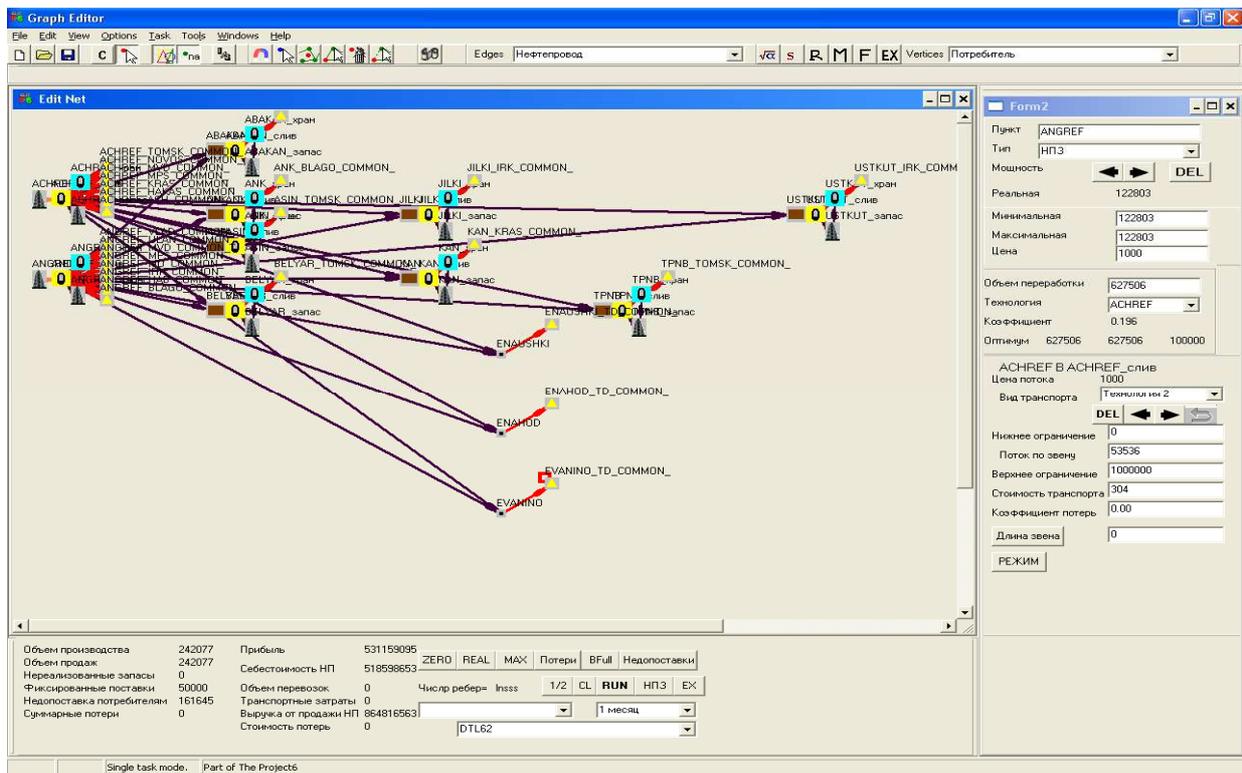


Рис. 1. Схема поставок дизтоплива

### Список литературы

1. Злотов А.В., Крылов И.А., Коваленко А.Г.// Задачи планирования производства, хранения, транспортировки и распределения нефтепродуктов. Москва. Препринт ВЦ РАН, 2009г.
2. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей. – Москва «Мир», 1984, с.496.

УДК 681.5:004

Э.К. Ибрагимова, Ильясов Б.Г., Г.А. Сайтова

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОСВЯЗНЫХ САУ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЯХ

### Аннотация

В данной работе освящена тема анализа многосвязной системы автоматического управления с запаздываниями в связях между ее подсистемами. Проведено исследование МСАУ на конкретном примере с помощью вычислений и моделирования в среде *MatLab*.

### Введение. Состояние, актуальность вопроса

Явление чистого запаздывания можно наблюдать во многих современных технических объектах управления (ОУ). Оно заключается в том, что с началом изменения сигнала на входе ОУ сигнал на выходе объекта начинает изменяться

только через некоторый интервал времени [1]. Примером объектов с запаздываниями по управлению могут служить реактивные двигатели в переходных режимах [2], ленточные транспортеры, прокатные станы, процессы сушки и горения, по состоянию – процессы с рециклом, в частности, процессы в измельчительных машинах или процессы в химических реакторах, по выходу – объекты управления с более инерционными датчиками измерения, чем сам объект [1].

Как правило, влияние запаздываний на процессы управления негативно. Наличие запаздывания в контуре управления ведет к возрастанию фазового сдвига, что может вызвать неустойчивость замкнутой системы. Одним из мало рассмотренных ранее вопросов является ситуация, когда чистое запаздывание присутствует не в самих подсистемах сложных объектов управления, а в связях между этими подсистемами. Если объект управления является многосвязным, проблема еще больше усложняется. Многомерным (многосвязным) системам управления с запаздываниями посвящено небольшое количество научных работ [1]. Целью данной работы является анализ многосвязной системы автоматического управления с запаздываниями в связях между ее подсистемами.

### Постановка задачи

Рассмотрим двусвязную систему, состоящую из одинаковых подсистем, имеющих голономные перекрестные связи, с равными по значению коэффициентами. В каждой из перекрестных связей имеется блок запаздывания  $\tau$ . Требуется провести анализ устойчивости системы с блоками запаздывания в перекрестных связях и найти критическое запаздывание  $\tau_{\text{крит}}$ , при котором система находится на границе устойчивости.

Для исследования устойчивости многосвязной САУ используется критерий, предложенный в работах [3,4].

Система находится на границе устойчивости, когда годограф подсистем проходит через корень  $x_i = u + jv = A_i e^{j\varphi_i}$  уравнения связи, то есть при некотором значении  $\omega_0$  получим

$$\Phi(j\omega_0) = \frac{A_0(\omega_0) e^{j[\varphi_0(\omega_0) - \omega_0 \tau]}}{1 + A_0(\omega_0) e^{j[\varphi_0(\omega_0) - \omega_0 \tau]}} = x_i$$

Из равенства получаем систему двух уравнений относительно  $\tau$  и  $\omega_0$ :

$$\begin{cases} |\Phi(\tau, \omega_0)| = |x_i| \\ \arg \Phi(\tau, \omega_0) = \arg x_i \end{cases}$$

Характеристическое уравнение связей с блоками чистого запаздывания при этом описывается следующим образом:

$$D(j\omega, x) = 1 + h_2 x^2 e^{-\tau j\omega} + \dots + h_n x^n e^{-\tau j\omega} = 0;$$

Исходя из критерия устойчивости многосвязной САУ [4], корни данного алгебраического уравнения не должны лежать внутри годографа АФЧХ системы.

Пример: найти критическое значение  $\tau_{кр}$  двусвязной гомогенной САУ, передаточная функция подсистемы которой равна  $\Phi(j\omega) = \frac{1}{4(j\omega)^2 + j\omega + 1}$ , характеристики связей равны  $h_{1,2}=0,5$ , корни характеристического уравнения связей  $1 + hx^2 e^{-\tau j\omega} = 0$  равны  $x_{1,2} = \pm \frac{2}{\sqrt{e^{-\tau j\omega}}}$ ; но нас интересует только корень  $x_1 = \frac{2}{\sqrt{e^{-\tau j\omega}}}$ , т.к. через второй корень годограф не проходит.

Пусть  $x_i$  – корень уравнения связи, при котором данная МСАУ на границе устойчивости, т.е. при некотором значении  $\omega_{кр}$  справедливо равенство:  $\Phi(j\omega_{кр}) = x_i$ ; При введении блоков запаздывания в перекрестные связи между подсистемами, корни характеристического уравнения связей образуют окружность с постоянным радиусом, равным  $R = \left| \frac{2}{\sqrt{e^{-\tau j\omega}}} \right|$  при  $\tau=0$ . Для того, чтобы система была на границе устойчивости необходимо и достаточно найти такое запаздывание, при котором корень характеристического уравнения связей находится в точке С, так как в этой точке -  $\omega_{кр}$  (рис.1). Проведем отрезок из начала координат комплексной плоскости, на которой построен годограф АФЧХ данной МСАУ, к точке С. Эта точка принадлежит окружности, составленной из корней характеристического уравнения связей, следовательно данный отрезок по модулю равен амплитуде передаточной функции системы в показательном ее виде, и равен  $R=2$ .

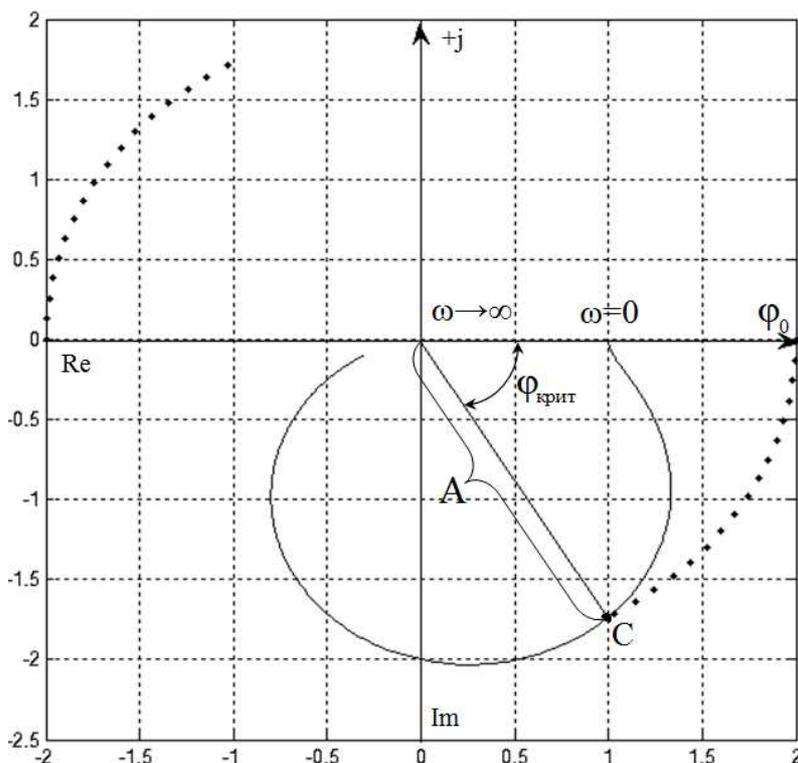


Рис. 1. Годограф АФЧХ МСАУ и корни ХУ связей с запаздыванием

Таким образом можно найти  $\omega_{cp}$ , для этого преобразуем передаточную функцию подсистемы в комплексный и показательный виды:

$$\begin{aligned}\Phi(j\omega) &= \frac{1}{4(j\omega)^2 + j\omega + 1} = \frac{1}{-4\omega^2 + j\omega + 1} = \frac{1}{(1 - 4\omega^2) + j\omega} \\ &= \frac{1 - 4\omega^2 - j\omega}{(1 - 4\omega^2)^2 - (j\omega)^2} = \frac{1 - 4\omega^2 - j\omega}{(1 - 4\omega^2)^2 + \omega^2} = \\ &= \frac{1 - 4\omega^2}{(1 - 4\omega^2)^2 + \omega^2} - j \frac{\omega}{(1 - 4\omega^2)^2 + \omega^2}; \\ X &= a + jb = Ae^{j\varphi}; \varphi = \arctg\left(\frac{b}{a}\right);\end{aligned}$$

$$|W(j\omega)| = A = R = \sqrt{\left(\frac{1-4\omega^2}{(1-4\omega^2)^2+\omega^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{(1-4\omega^2)^2+\omega^2}\right)^2}; \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\frac{\omega}{(1-4\omega^2)^2+\omega^2}}{\frac{1-4\omega^2}{(1-4\omega^2)^2+\omega^2}}\right) = \arctg\left(\frac{\omega}{1-4\omega^2}\right); \quad (2)$$

Таким образом показательный вид отобразим:

$$\Phi(j\omega) = \left(\sqrt{\left(\frac{1-4\omega^2}{(1-4\omega^2)^2+\omega^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{(1-4\omega^2)^2+\omega^2}\right)^2}\right) e^{j \arctg\left(\frac{\omega}{1-4\omega^2}\right)}; \quad (3)$$

Исходя из того, что  $A=R=2$ , и (1), можем найти частоту среза:  $\omega_{cp}=0,433$ .

Приравнивая выражение для корня характеристического уравнения связей между подсистемами к показательному виду передаточной функции подсистемы МСАУ (3), имеем:

$$\begin{aligned}& \frac{2}{\sqrt{e^{-\tau_{крит}j\omega_{cp}}}} = \\ &= \left(\sqrt{\left(\frac{1 - 4\omega_{cp}^2}{(1 - 4\omega_{cp}^2)^2 + \omega_{cp}^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_{cp}}{(1 - 4\omega_{cp}^2)^2 + \omega_{cp}^2}\right)^2}\right) e^{j \arctg\left(\frac{\omega_{cp}}{1 - 4\omega_{cp}^2}\right)} \\ & \quad \Leftrightarrow \\ & 2e^{\frac{1}{2}\tau_{крит}j\omega_{cp}} = 2e^{j \arctg\left(\frac{\omega_{cp}}{1 - 4\omega_{cp}^2}\right)} \Leftrightarrow \\ & \frac{1}{2}\tau_{крит}j\omega_{cp} = j \arctg\left(\frac{\omega_{cp}}{1 - 4\omega_{cp}^2}\right); \quad (4)\end{aligned}$$

Из того, что частота среза  $\omega_{cp}=0,433$  и выражения (4), критическое запаздывание, при котором система находится на границе устойчивости, равно  $\tau_{крит}=1,076$  с. Таким образом рассчитанное значение критического запаздывание является искомой величиной. При большем запаздывании корни характеристического уравнения связей входят за границы годографа АФЧХ, а это является признаком потери устойчивости системы.

## Список литературы

1. Филимонов А. Б. Спектральная декомпозиция систем с запаздываниями. Компенсация запаздываний. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2002. 288 с.
2. Черкасов Б. А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1988. 360 с.
3. Ильясов Б.Г., Кабальнов Ю.С. Исследование устойчивости однотипных многосвязных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами. // Автоматика и телемеханика. – М., РАН, 1995, № 8. – С. 82-90.
4. Ильясов Б.Г., Сайтова Г.А. Исследование линейных многосвязных САУ с запаздыванием. СПб.: Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах, 2012., с.132-135.

УДК 622.276.53:681.5

Р.В. Искужин

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

### Аннотация

Статья посвящена одной из актуальных задач в области автоматизации процессов механизированной добычи нефти на базе УЭЦН – созданию алгоритмов управления работой нефтедобывающей скважины. Представлена структура системы управления, задачи управления и результаты компьютерного моделирования предложенных алгоритмов управления.

### Введение

В настоящее время темпы повышения объёмов добычи нефти, а также понятное желание нефтяных компаний снижать себестоимость добычи приводят к необходимости создания так называемых "интеллектуальных" скважин. "Интеллектуальной" скважиной обычно называют комплекс наземного и подземного оборудования, включающий в себя, как правило, станцию управления работой насосной установки с преобразователем частоты (ПЧ) и телеметрической системой (ТС). Контроллер станции управления должен на основе получаемой информации по специальному алгоритму управлять работой насосной установки с целью обеспечения заданного режима работы, например, поддержания дебита скважины.

### Структура системы управления нефтедобывающей скважины

На первом этапе исследований был определен перечень объектов НС, моделирование которых является необходимым с точки зрения синтеза алгорит-

мов управления. В общем случае к данным объектам относятся: объект управления, исполнительные механизмы, измерительная система. Для выделения указанных объектов в рамках НС, была проанализирована ее обобщенная структура, включающая в себя следующие основные подсистемы (рис. 1):

1) Скважинная система (СС) - система резервуаров, в которых располагается добываемая жидкость: а) зона дренирования скважины (ЗДС) – область продуктивного пласта, на которую оказывает влияние данная скважина; б) обсадная колонна (ОК) – колонна труб, связанная с ЗДС перфорационными отверстиями, обеспечивает предварительное накопление добываемой жидкости; в) насосно-компрессорные трубы (НКТ) - колонна труб, расположенная в ОК, обеспечивает перемещение добываемой жидкости на поверхность.

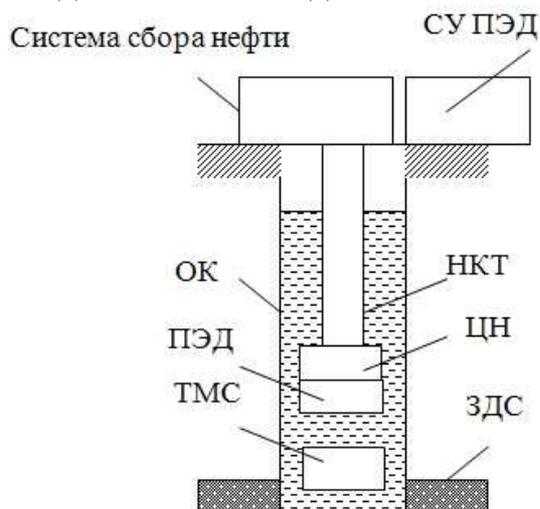


Рис. 1. Структура нефтяной скважины

2) Жидкость в скважинной системе (ЖСС) – многофазная смесь (нефть, вода, газ, песок и др.), распределена по резервуарам СС: а) жидкость в ЗДС; б) жидкость в ОК; в) жидкость в НКТ.

3) Установка электроцентробежного насоса (УЭЦН): а) центробежный насос (ЦН) - обеспечивает перекачивание добываемой жидкости из ОК в НКТ и далее на поверхность; б) погружной электродвигатель (ПЭД) – обеспечивает вращение вала ЦН.

4) Станция управления погружным электродвигателем (СУ ПЭД): 3-х фазная сеть, преобразователь частоты, повышающий трансформатор, контроллер.

5) Телеметрическая система (ТС) - обеспечивает измерение, сбор, обработку и передачу информации о параметрах объектов скважинной системы, включает в себя: а) термоманометрическая система (ТМС) погружной телеметрии; б) наземная измерительная система.

На основе анализа структуры НС определена обобщенная структура САУ НС, включающая в себя (рис. 2): объект управления - жидкость в ОК, НКТ, ЗДС; исполнительный механизм – ПЭД и ЦН; измерительная система (ИС); преобразователь частоты (ПЧ); система принятия решения - контроллер.

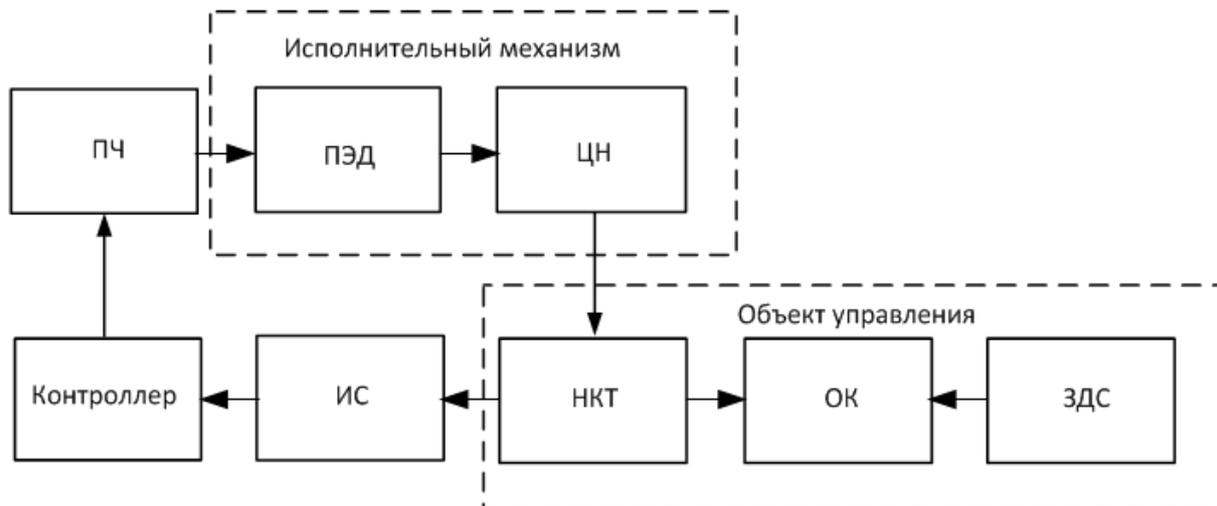


Рис. 2. Обобщенная структура САУ НС

### Математическая модель нефтедобывающей скважины

В качестве формы динамической модели НС как объекта управления предлагается одна из наиболее универсальных и эффективных форм, применяемых в современной теории автоматического управления - форма в переменных состояния [1]. Данная форма, представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка вида:

$$\dot{X} = F(X, U, V), \quad (1)$$

где  $X$  – вектор переменных состояния объекта;  $\dot{X} = \frac{dX}{dt}$  – вектор первых производных по времени переменных состояния объекта;  $U$  – вектор управляющих воздействий;  $V$  – вектор возмущающих воздействий.

Анализ указанных подсистем показывает, что в качестве собственно объекта управления в НС выступает - система жидкостей, в качестве исполнительного механизма, непосредственно воздействующего на объект управления, выступает - УЭЦН. С точки зрения задачи синтеза алгоритмов управления эти подсистемы целесообразно объединить в единое понятие – объект управления. В результате искомая структура модели НС как объекта управления принимает вид, представленный на рис. 3.

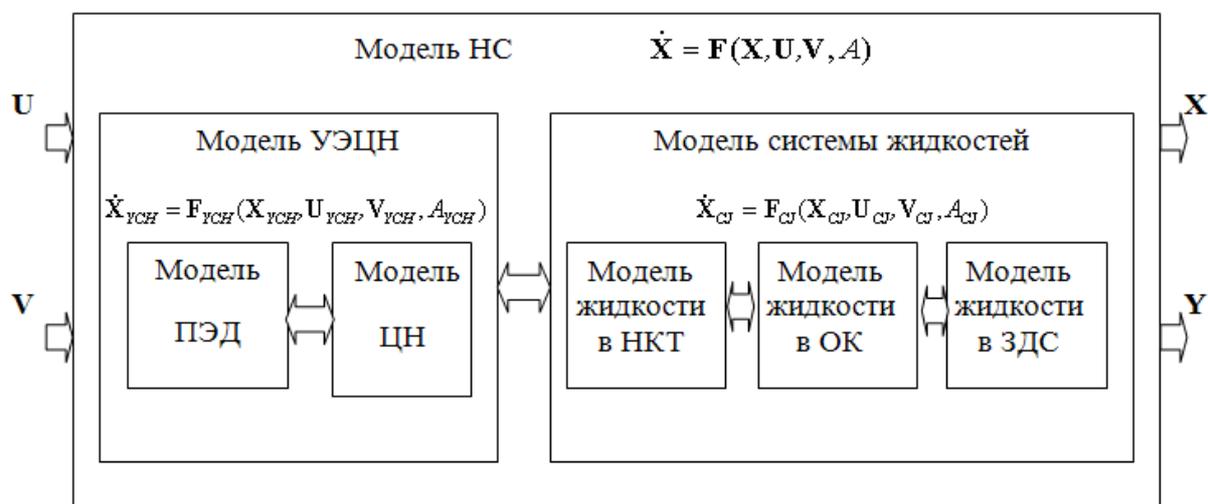


Рис. 3 Структура динамической модели НС как объекта управления

Вывод системы уравнений динамической модели НС представлен в предыдущих статьях [2,3].

### Синтез алгоритмов управления нефтедобывающей скважины

На втором этапе исследований были рассмотрены алгоритмы управления работой НС на основе П- и ПИ-регуляторов. Были выделены две задачи управления:

- 1) поддержание заданного дебита  $Q_{тр}$ ;
- 2) достижение максимального КПД  $\eta$  центробежного насоса при изменении параметров жидкости.

### Результаты моделирования

Для проверки адекватности алгоритмов управления было проведено моделирование в *Microsoft Visual Basic 2010 Express*. На рисунке 4 представлены графики моделирования алгоритмов управления на основе П- и ПИ- регуляторов. ПИ-регулятор обеспечивает менее длительное время переходного процесса.

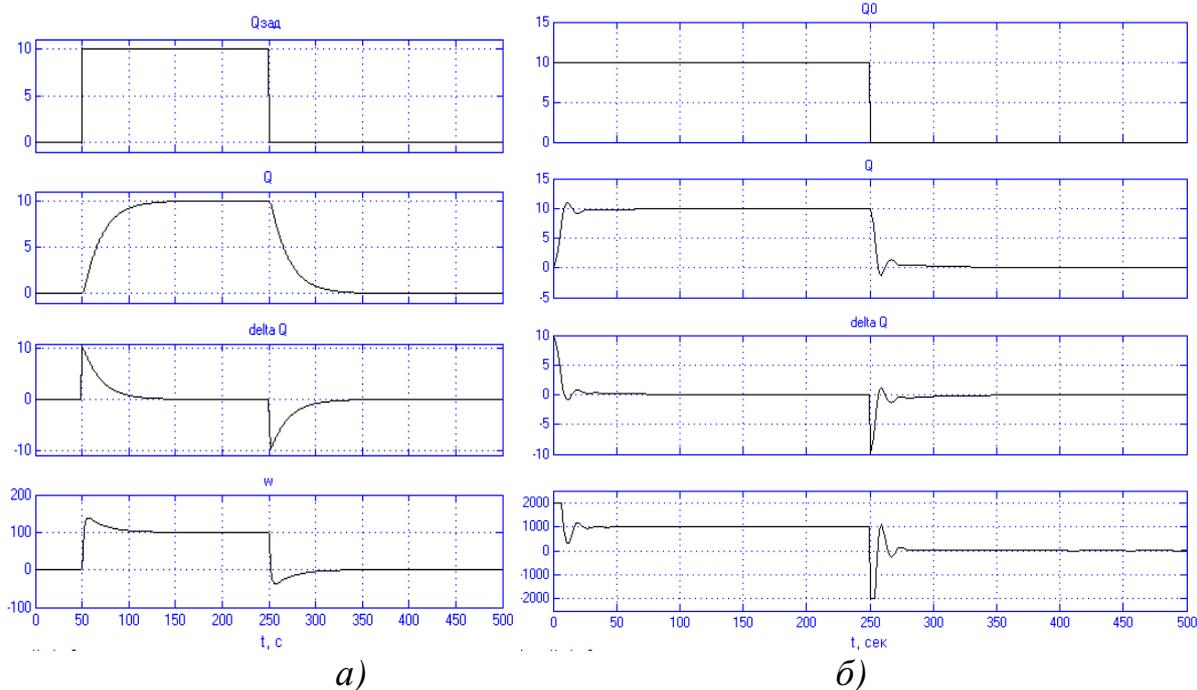


Рис. 4 Графики моделирования алгоритмов управления:  
 а) П-регулятор; б) ПИ-регулятор

### Заключение

В результате проведенных исследований предложены алгоритмы управления нефтедобывающей скважины на базе УЭЦН как объекта управления. Адекватность предложенных алгоритмов подтверждается результатами проведенных вычислительных экспериментов.

### Список литературы

1. Александров А. Г., Артемьев В. М., Афанасьев В. Н. и др. Справочник по теории автоматического управления. Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
2. Нугаев И. Ф., Искужин Р. В. Комплекс математических моделей для решения задач синтеза алгоритмов управления процессами в нефтедобывающих скважинах // Вестник УГАТУ. 2012. № 8
3. Нугаев И. Ф., Искужин Р. В. Динамическая модель нефтедобывающей скважины на базе УЭЦН как объекта управления // Нефтегазовое дело. 2012. № 5. С. 31–46.

## **НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

### **Аннотация**

Анализируются два известных способа резервирования вычислителей. Целью анализа является обоснование целесообразного способа резервирования вычислителей в системе управления беспилотного летательного аппарата.

### **Введение**

В последние десятилетия наблюдается существенный рост рынка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с предполагаемым использованием их, в том числе, в гражданских целях. В ближайшем будущем БПЛА предполагается использовать в неразделенном воздушном пространстве. Это приведет к росту требований по безопасности полета БПЛА до уровня пилотируемых ЛА. Надежность системы управления БПЛА наиболее существенно сказывается на уровне безопасности полетов. Это вызывает необходимость резервирования вычислителей системы управления, как это делается сейчас на пилотируемых ЛА. Целью статьи является обоснование целесообразного способа резервирования вычислителей в системе управления БПЛА. В качестве основных методов исследований используются методы теории надежности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 13-08-01430-а.

### **Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов**

В обзоре [1] указывается, что беспилотные системы являются наиболее крупным достижением в военной авиации за последние десятилетия и будут иметь дальнейшее развитие как новый вид перспективного оружия. Число беспилотных ЛА в составе ВВС армии США за первое десятилетие XXI века увеличилось в 136 раз: с 50 единиц в 2000 г. до 6800 в 2010 г. [2]. По оценкам специалистов, существует и гражданская ниша применения беспилотных систем, развитие которой является весьма перспективным [3]. В ближайшем будущем БПЛА могут найти применения для решения следующих задач [3, 4]:

- в нефтегазовой промышленности – для мониторинга магистральных нефте- и газопроводов и других объектов;
- для контроля за радиационно-химической обстановкой;
- для борьбы с чрезвычайными ситуациями;
- в сельском хозяйстве – для обработки полей химикатами, наблюдения за посевами и патрулирования сельхозугодий;
- наблюдения за территориями в интересах выявления браконьеров, незаконных рубок леса и др.;
- для кадастровой съемки.

Так в [4] указывается, что при использовании пилотируемого вертолета Ми-8 для мониторинга газовых магистралей стоимость летного часа превышает

2,5 тыс. долларов США, в то время как работа беспилотного вертолета будет стоить как минимум в пять раз меньше.

### **Требования по безопасности к беспилотным летательным аппаратам**

Интенсивное применение БПЛА предполагает их использование в неразделенном воздушном пространстве. В [1] отмечается, что общим условием при выполнении полетов БПЛА в неразделенном воздушном пространстве является обязательное соблюдение всех уровней безопасности в гражданском воздушном пространстве в соответствии с требованиями ИКАО, в силу которых БПЛА должен удовлетворять таким же, как для других воздушных судов, стандартам безопасности и эксплуатации. Это накладывает высокие требования на бортовой комплекс управления БПЛА как по уровню надежности, так и по уровню автоматизации. Но даже если рассматривать БПЛА военного назначения, предназначенные для использования в военное время, когда неразделенное воздушное пространство закрыто, то остается другая сторона требований по надежности бортового комплекса управления – достаточно высокая стоимость многоцелевых БПЛА. Так, анализ небоевых потерь БПЛА в министерстве обороны США показывает, что 25 % таких потерь связано с ошибками системы управления [1]. Поэтому не следует полагать, что требования по надежности к БПЛА существенно ниже, чем к пилотируемым.

### **Схемы резервирования вычислителей системы управления**

Система управления БПЛА строится на принципах электродистанционной системы управления (ЭДСУ). В настоящее время наблюдается тенденция объединения функций ЭДСУ и системы автоматического управления в одной комплексной системе управления (КСУ). Для обеспечения требуемого уровня надежности системы вычислители КСУ резервируются, как правило, способом «горячего» или нагруженного резерва. В настоящее время в ЭДСУ наибольшее распространение получили две основные схемы резервирования. Рассмотрим их для случая 4-х кратного резервирования.

Первая из них описана, например, в [5] и приведена на рис. 1 (а). Здесь управляющие сигналы формирует каждый из 4-х вычислителей В1 – В4. В модуле кворумирования (МК) управляющие сигналы кворумируются на основе мажоритарной логики и результирующий сигнал подается на управление приводом (П). В силу используемой мажоритарной логики при последовательных отказах такая система сохраняет работоспособность при любых двух исправных вычислителях. Но при отказе 3-х вычислителей работоспособность системы теряется. Поэтому схема надежности такой системы соответствует рис. 1 (б) и представляет собой шесть параллельных ветвей, соответствующих возможным комбинациям работоспособных вычислителей, при которых сохраняется работоспособность вычислительной части КСУ в целом.

Второй способ резервирования, называемый “канал-модель”, приведен на рис. 2 (а) (см., например, [6]).

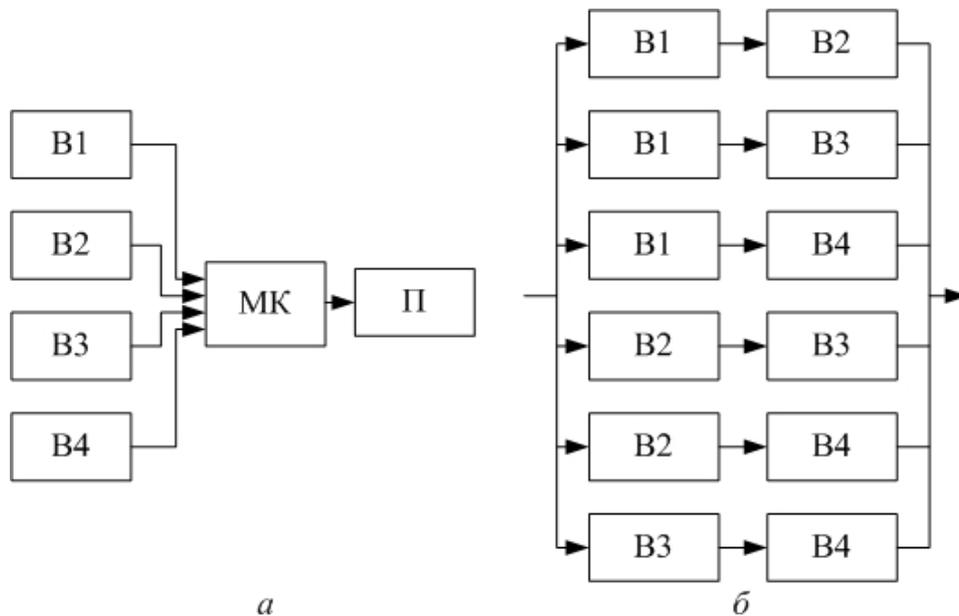


Рис. 1. Схема 1 резервирования вычислителей и ее схема надежности

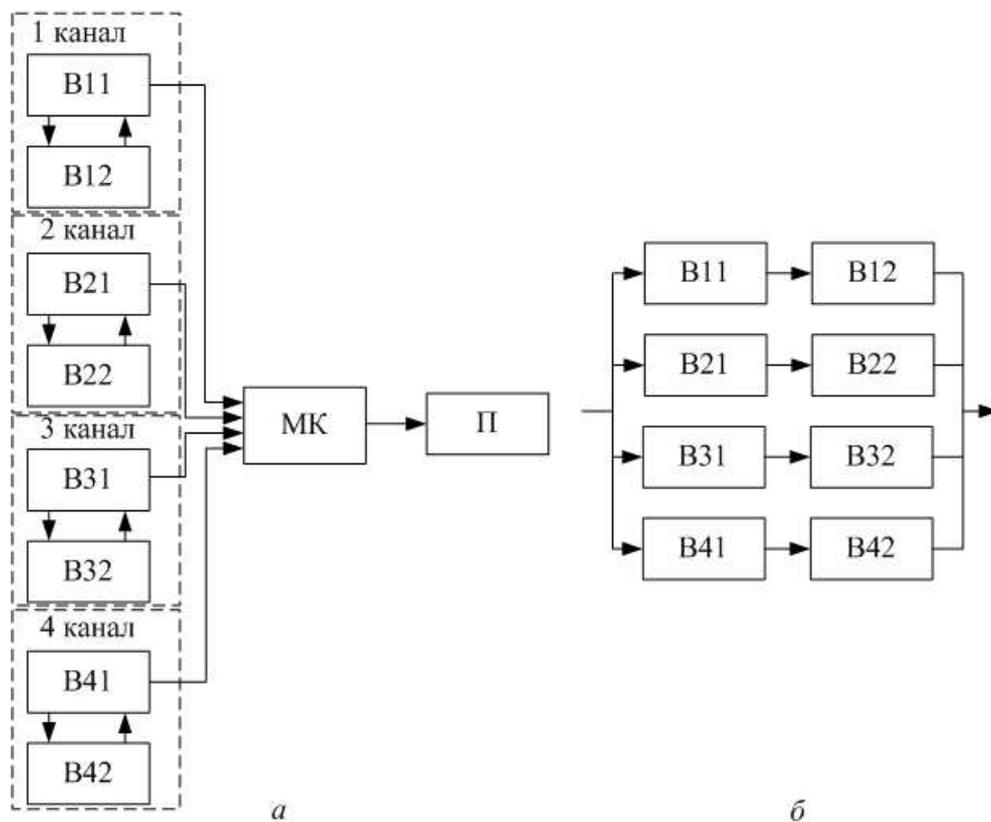


Рис. 2. Схема 2 резервирования вычислителей и ее схема надежности

Здесь в формировании управляющего сигнала участвуют только четыре вычислителя B11, B21, B31 и B41. Вычислители же B12, B22, B32 и B42 играют функции модели. На них поступает та же входная информация и в них реализованы те же программы вычислений, что и в управляющих вычислителях. При рассогласовании результатов вычислений между управляющим вычислителем и его моделью соответствующий блок самостоятельно переходит в состояние

отказа. По аналогии со схемой рис. 1 (а) в МК сигналы управления каждого блока кворумируются и на привод поступает результирующий сигнал.

### Сравнительный анализ схем резервирования по уровню надежности

Будем использовать два показателя надежности: вероятность отказа вычислительной части КСУ и достоверности выявления отказа схемой контроля.

Обозначим в качестве  $P_B$  – вероятность безотказной работы, а  $Q_B$  – вероятность отказа вычислителя в течении 1 часа полета. Данные вероятности примем для всех вычислителей схем рис. 1 (а) и рис. 2 (а) равными. В качестве  $P_{МК}$  и  $Q_{МК}$  обозначим соответствующие вероятности безотказной работы и отказа для МК. Тогда вероятность отказа вычислительной части КСУ рис. 1 (а) и рис. 2 (а) вычисляется по следующим формулам:

$$Q_1 = 1 - (1 - (1 - P_B^2)^6)P_{МК}, \quad Q_2 = 1 - (1 - (1 - P_B^2)^4)P_{МК}.$$

Если принять, что вероятность отказа вычислителя в течении одного часа полета составляет  $Q_B = 10^{-4}$ , а вероятность безотказной работы МК -  $P_{МК} = 1$ , то  $Q_1 = 6,38 \times 10^{-17}$ , а  $Q_2 = 1,6 \times 10^{-11}$ . Для второй схемы вероятность отказа на восемь порядков выше.

Теперь сравним данные схемы по достоверности выявления отказа схемой контроля. Пусть МК выявляет отказ с достоверностью  $P_{СК1}$  для обеих схем, а схема контроля канал-модель (рис. 2 (а)) – с достоверностью  $P_{СК2}$ .

Тогда при появлении единичного отказа для схемы рис. 1 (а) достоверность его определения будет составлять  $P_{СК} = P_{СК1}$ , а для схемы рис. 2 (а)

$$P_{СК} = 1 - (1 - P_{СК1})(1 - P_{СК2}).$$

Пусть, например,  $P_{СК1} = P_{СК2} = 0,999$ . Тогда вероятность пропуска отказа для схемы рис. 1 будет составлять  $10^{-3}$ , а для схемы рис. 2 составляет  $10^{-6}$ .

Таким образом, по достоверности обнаружения отказа более предпочтительной является схема рис. 2 (а).

### Список литературы

1. Современное состояние и перспективы развития беспилотных авиационных систем XXI века. Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников / Под ред. Е.А. Федосова. – М.: ГосНИИАС, 2012. – 182 с.
2. Беспилотные вертолеты // Аэрокосмическое обозрение. 2010. № 4. С. 98 – 103.
3. Щербаков В. Беспилотники для всех // Беспилотная авиация. Спецвыпуск Interpolitex – UVS-TECH 2012. 2012. С. 8 – 12.
4. Вежновец А. Иллюзии и реальность беспилотного полета // Вертолетная индустрия. 2010. Май. С. 14 – 17.
5. Оболенский Ю.Г. Управление полетом маневренных самолетов. – М.: Воениздат, 2007. - 480 с.
6. FBW for the S-92 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.aviationtoday.com/av/rotocraft/FBW-for-the-S-92\\_774.html](http://www.aviationtoday.com/av/rotocraft/FBW-for-the-S-92_774.html) (дата обращения 14.03.2013).

## ДВУХМЕРНЫЙ ЧЕТКИЙ ЛОГИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА ПАРОВОГО КОТЛА

### Аннотация

Предложено с помощью двухмерного четкого логического регулятора улучшить показатели качества регулирования давления и температуры пара парового котла. Произведен синтез четкого регулятора и представлена структурная схема управления.

В существующих системах регулирования технологических параметров парового котла как сложного динамического объекта управления обработка всех операций вычислительным процессором регулятора происходит последовательно и может продолжаться после нахождения требуемого значения параметра котла, что влечет за собой увеличение использования вычислительных ресурсов и потери быстродействия, а соответственно увеличение энергозатрат [1]. В данных системах, как правило, используются нечеткие регуляторы и текущее значение параметров объекта управления внутри каждого терма имеют разные значения функции принадлежности. Хотя в реальных условиях человеком-оператором (экспертом) они воспринимаются как постоянные. Кроме того, из-за наложения смежных термов одно и то же значение физической величины представляется значениями нескольких (обычно двух) лингвистических переменных, что противоречит здравому смыслу, поскольку в любой конкретный момент времени любая физическая величина может принимать одно и только одно значение. К тому же процесс нечеткого логического вывода является более трудоемким, сложным и менее точным по сравнению с аналогичным выводом в двузначной (булевой) логике [2].

Серьезным недостатком одномерных систем автоматического управления параметрами многомерного объекта является влияние управления одним параметром на другие параметры объекта управления. Так, управление давлением пара  $\Delta P_{нар}$  в испарителе котла влияет на температуру пара  $\Delta T_{нар}$  на выходе нагревателя, а управление температурой пара  $\Delta T_{нар}$  на выходе нагревателя влияет на давление пара  $\Delta P_{нар}$  в испарителе котла. Необходимо учитывать, что перечисленные параметры связаны не только со своими, но и смежными входными параметрами, являются нелинейными и регулируются в широких диапазонах [3]. Использование классических ПИД-регуляторов и типовых нечетких регуляторов в этом случае не обеспечивают должной точности и быстродействия, что приводит к увеличению затрат. Наконец, использование упомянутых регулято-

ров в системе управления паровым котлом из-за сложного взаимного влияния контуров регулирования не обеспечивает должную компенсацию связей между регулируемым параметрами.

На рис.1 представлена структурная схема управления парового котла тепловой электростанции в виде двух основных блоков «нагреватель + испаритель» (на рис.2 обведена пунктиром) на основе двух четких регуляторов (ЧЛР1 и ЧЛР2) лишенная упомянутых недостатков. Регулируемыми переменными данного объекта является давление пара  $\Delta P_{пар}$  в испарителе и температура пара  $\Delta T_{пар}$  на выходе нагревателя. Управляющими переменными являются расход топлива  $\Delta G_T$  и расход воды  $\Delta m_в$ . Расходы топлива  $\Delta G_T, \%$ , и воды  $\Delta m_в, \%$ , в модели приведены к относительным значениям, а выходные величинами являются ошибки поддержания давления  $\Delta P_{пар}$ , бар, и температуры  $\Delta T_{пар}$ , К, пара.

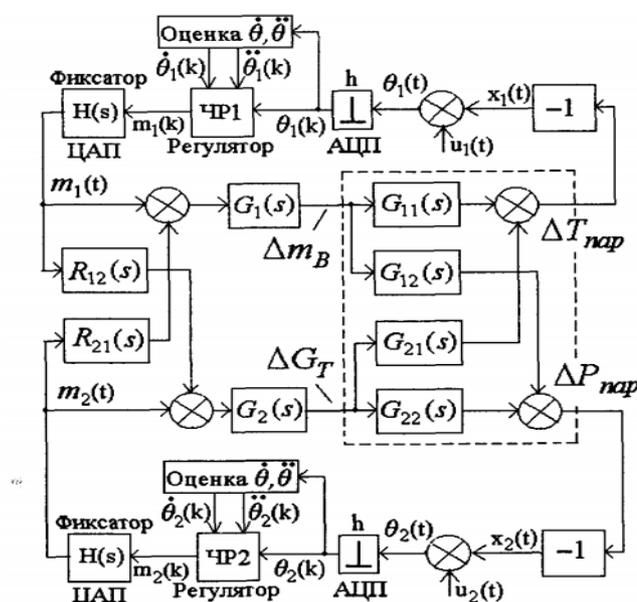


Рис. 1. Структурная схема управления парового котла на основе четких логических регуляторов

В существующих нечетких регуляторах физические величины при помощи процедуры фаззификации преобразовываются в лингвистические переменные, термы которых представляют собой налегающие друг на друга нечеткие множества с заданной формой функции принадлежности (треугольной, колоколообразной и т.д.). Поскольку в таких случаях аргументы являются нечеткими, то процесс логического вывода однозначно является нечетким. Для устранения указанных недостатков предлагается в процессе фаззификации физические величины представить в виде совокупности четких множеств, идентифицирующих значения этих величин на заданном отрезке универсальной числовой прямой. Каждому терму на этой шкале отводится отдельный участок, который не должен перекрываться соседними термами [4].

Уравнения объекта управления в матричной форме имеют вид:

$$\begin{vmatrix} \Delta T_{nap} \\ \Delta P_{nap} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} G_{11}(s)G_{21}(s) & \Delta m_e \\ G_{22}(s)G_{22}(s) & \Delta G_T \end{vmatrix},$$

где  $G(s) = \begin{vmatrix} G_{11}(s)G_{21}(s) \\ G_{22}(s)G_{22}(s) \end{vmatrix}$  – передаточная матрица двухмерного объекта управления.

Передаточные функции в матрице двухмерного объекта получены по измерениям реального парогенератора.

$$\text{Нагреватель: } G_{11}(s) = \frac{\Delta T_{nap}(s)}{\Delta m_e(s)} = -\frac{(1+13,81s)^2(1+18,4s)}{(1+59s)^5}.$$

$$\text{Испаритель: } G_{22}(s) = \frac{\Delta P_{nap}(s)}{\Delta G_T(s)} = -\frac{0,96}{695s(1+15s)}.$$

$$\text{Связь нагреватель-испаритель: } G_{12}(s) = \frac{\Delta P_{nap}(s)}{\Delta m_e(s)} = \frac{0,0605}{695s}.$$

$$\text{Связь испаритель-нагреватель: } G_{21}(s) = \frac{\Delta T_{nap}(s)}{\Delta m_e(s)} = \frac{1,771}{(1+153,5s)(1+24s)(1+15s)}.$$

Передаточная матрица с учетом исполнительных устройств (электродвигатель + регулируемый вентиль) может быть записана следующим образом:

$G(s) = \begin{vmatrix} G_1(s)G_{11}(s)G_2(s)G_{21}(s) \\ G_1(s)G_{12}(s)G_2(s)G_{22}(s) \end{vmatrix}$ . Для развязки контуров (для отдельного управления

температурой и давлением) введены перекрестные связи, из которых получена

матрица перекрестных связей в виде  $R(s) = \begin{vmatrix} 1 & R_{21}(s) \\ R_{12}(s) & 1 \end{vmatrix}$ . Передаточная матрица

общего объекта управления с перекрестными связями (передаточная матрица в разомкнутом состоянии) (параметр преобразования по Лапласу  $s$  для упрощения записи опущен):

$$G_0R = \begin{vmatrix} G_1G_{11} + G_2G_{21}R_{12} & G_1G_{11}R_{21} + G_2G_{21} \\ G_1G_{12} + G_2G_{22}R_{12} & G_1G_{12}R_{21} + G_2G_{22} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Если выполнить условия  $G_1 = G_2 = G$ ;  $R_{12} = -\frac{G_{12}}{G_{22}}$ ;  $R_{21} = -\frac{G_{21}}{G_{11}}$ , то матрица (1)

принимает следующий вид:

$$G_0R = \begin{vmatrix} G(G_{11} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{22}}) & 0 \\ 0 & G(G_{22} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{11}}) \end{vmatrix}.$$

Отсюда следует, что, собственное движение рассматриваемых контуров не влияют друг на друга. В целом система развязана по сигналам задающих переменных и возможно отдельное управление температурой и давлением пара.

Передаточные функции перекрестных связей в этом случае определяются следующими выражениями:

$$R_{12} = -\frac{G_{12}}{G_{22}} = -0,063(1+15s); \quad R_{21} = -\frac{G_{21}}{G_{11}} = \frac{1,77(1+59s)^5}{(1+153,5s)(1+24s)(1+15s)(1+13,81s)(1+18,4s)}$$

Когда система развязана по сигналам задающих переменных и возможно отдельное управление температурой и давлением пара, то четкие логические регуляторы ЧР1 и ЧР2 работают только на «свой» канал (рис.1).

Для иллюстрации использования четких логических регуляторов на рис. 2 изображена универсальная числовая ось регулируемого параметра  $\Delta P_{\text{пар}}$ .

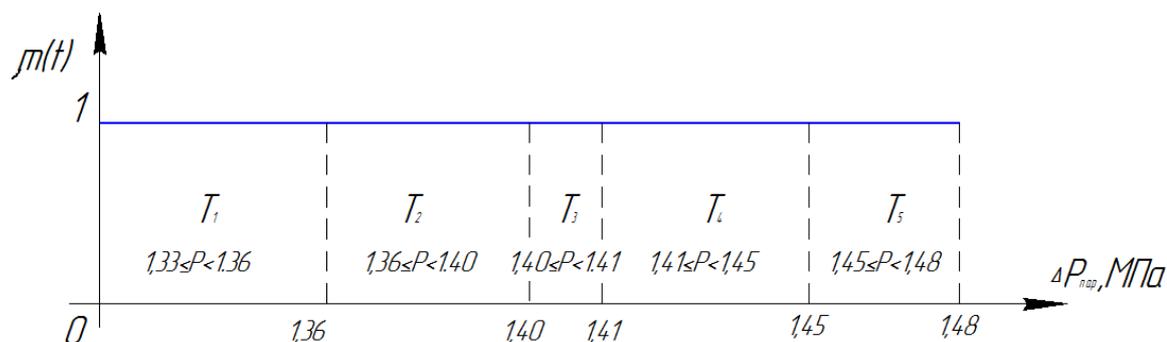


Рис .2. Четкие термы регулируемого параметра  $\Delta P_{\text{пар}}$  на универсальной числовой оси

Поскольку термы представляют собой четкие множества, то их функции принадлежности имеют прямоугольную форму. Терм будет представлять собой несущее множество, состоящее из непересекающихся подмножеств  $T_1$ - $T_5$ . Интерпретация температуры пара аналогична.

Таким образом, в двумерной системе регулирования давления и температуры пара предложено использовать логический регулятор с четкими термами, который по сравнению с нечеткими регуляторами обладает меньшей погрешностью и большим быстродействием.

### Список литературы

1. Е. А. Муравьева, А.Ф. Антипин. Многомерный дискретно-логический регулятор расхода воздуха парового котла с минимизацией времени отклика. Вестник/ Вестник УГАТУ.Т.13, №2 (35). Уфа: УГАТУ, 2009, С.83-87
2. М.Б. Гузаиров, Е.А. Муравьева. Управление технологическими процессами, реализованное на четких логических регуляторах. – М.: Машиностроение, 2012. – С. 305
3. В.И. Гостев. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: «Радіаматор», 2008. – С. 972
4. А.И. Каяшев, Е.А. Муравьева, Р.Ф. Габитов. Scada-система на основе многомерного четкого логического регулятора для управления цементной печью/ Вестник УГАТУ.Т.14, №4 (39). Уфа: УГАТУ, 2009, С.119-125

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

### Аннотация

В работе представлены результаты разработки автоматизированной системы управления и моделирования технологического процесса переработки ЖРО.

### Введение

В 1972 году был введен в эксплуатацию цех дезактивации Петербургского института ядерной физики (УРАН ПИЯФ), за стенами которого проводится очистка загрязненной, радиоактивными нуклидами, воды. Процесс дезактивации жидких радиоактивных отходов (ЖРО) состоит из трех стадий. На первой стадии происходит процесс коагуляции, ЖРО смешивают с  $NaOH$ . Активность раствора понижается в 5 раз. На следующей стадии происходит процесс упаривания коагулянта, далее пар конденсируется в теплообменниках и образуется конденсат сокового пара. Активность после второй стадии падает в  $10^5$  раз. На окончательном этапе конденсат сокового пара очищают на ионообменных фильтрах, пропуская через колонны с катионитом и анионитом, получая фильтрат. Активность фильтрата понижается ещё в  $10^2$  раз.[4] На заре института цех работал постоянно, и перерабатывались только неорганические, радиоактивные отходы. В цехе имеется старая система автоматики, основанная на регуляторах уровня (РУ-2), которая не была рассчитана на переработку органических отходов и, следовательно, не способна адекватно регулировать уровень коагулянта в выпарном аппарате, в котором образуется большое количество пены из-за органики. Если в аппарате не контролировать уровень пены, то может произойти загрязнение тарелок выпарного аппарата и теплообменников, находящихся на выходе аппарата.

Существует ещё одна проблема в этом процессе. Отходы поступают в цех самотеком, по системе коммуникаций, но цех перерабатывает только низко активные отходы (НАО), а средне активные (САО) отправляет на Ленинградскую атомную электростанцию (ЛАЭС). Процесс распределения отходов на НАО и САО осуществлялся вручную. Так как ЖРО поступаю не только днем, но и ночью, когда в цехе отсутствуют операторы, появилась необходимость автоматического распределения отходов на НАО и САО для отправления их в разные приемные монжусы. В существующую автоматику не была заложена регулировка направления подачи ЖРО в зависимости от активности по альфа-, бета- и гамма-излучению, такое переключение осуществлялось вручную.

## Процесс разработки

Из введения можно подчеркнуть, что к сложной технологии процесса и опасному производству добавляются особенности, с которыми не справятся традиционные системы автоматического регулирования, основанные на ПИД регуляторах. Поэтому, начальником цеха дезактивации УРАН ПИЯФ Капустиным В.К. была поставлена следующая задача – разработать адекватную модель процесса переработки ЖРО и спроектировать автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) на основе нечетких регуляторов и искусственном интеллекте. Такой стенд необходим для проверки теоретического предположения о том, что такая АСУТП справится с задачей управления сложным и ответственным процессом дезактивации НАО.

Для решения такой сложной задачи был разработан документ «техническое задание на разработку автоматизированной системы управления технологическим процессом переработки жидких радиоактивных отходов на станции спецводоочистки УРАН ПИЯФ», и утвержден руководством цеха и института.

На основании технического регламента и чертежей аппаратов, установок и монжусов была разработана модель всей линии переработки ЖРО [4]. В процессе создания модели, особых трудностей не возникло, кроме одной. Необходимо было вывести зависимость альфа-, бета-, гамма- активности сокового пара (соковый пар - пар на выходе выпарного аппарата, образующийся при упаривании НАО) от уровня ЖРО в аппарате, уровня флегмы на тарелках, температуры кипятильника, температуры и расхода поступающих отходов. После разработки начался этап тестирования модели. На этом этапе, в течении двух недель, проверялись все аппараты, задвижки, емкости и т.д. на соответствие техническому регламенту. Особое внимание было уделено времени протекания процессов.

Убедившись в соответствии модели техническому регламенту, было начато проектирование АСУТП. Принципиальная схема разрабатываемой модели АСУ ТП показана на рис. 1. Распишем функции каждой составляющей АСУ ТП. Контроллер выполняет только функции устройства связи с объектом (УСО). К контроллеру, через *Ethernet*, подключен сервер баз данных (БД). Сервер БД служит для извлечения параметров технологического процесса из контроллера и сохранения всех изменений в реляционную БД, в основе которой лежит *Microsoft SQL Server 2012*. Из сервера баз данных информацию забирает сервер управления, в котором находится АСУ и после обработки параметров объекта управления сервер выдает управляющие сигналы, непосредственно, на контроллер. Сервер БД постоянно отслеживает изменения в контроллере, а сервер управления работает с контроллером по прерыванию и имеет наивысший приоритет прерывания. [2]

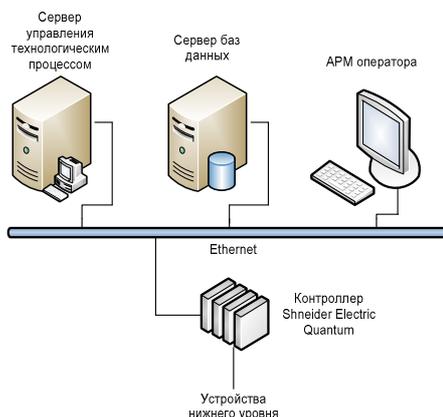


Рис. 1. Принципиальная схема АСУ

Для упрощения разработки системы управления, процесс был разбит на четыре узла: узел приема ЖРО, узел коагуляции, узел выпаривания и узел ионной фильтрации.

Для каждого узла создана отдельная система управления, независимая от других узлов, но подчиняющаяся глобальной автоматизированной системе управления (АСУ), как показано на рис. 2.

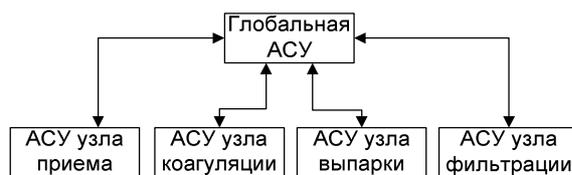


Рис. 2. Структура АСУ

Распишем функции и особенности каждой АСУ в отдельности.

Система управления узла приема отвечает за контроль альфа-, бета-, гамма-активности ЖРО в приемной трубе и распределении в два приемных монжуса с НАО и САО емкостью по 10 м<sup>3</sup>. Как только монжус с НАО заполнится на 50%, автоматически включается перекачка в два бака накопителя по 300 м<sup>3</sup>. При заполнении монжуса с САО на половину включается перекачка в бак с отходами, минуя переработку.

Система управления узлом коагуляции предназначена для осуществления процесса коагуляции (осветления) по команде оператора. После подачи команды на запуск узла, АСУ проверяет уровень в баках накопителях НАО и если уровень в обоих баках ниже 10%, то узел не запускается и горит индикатор о неготовности узла к пуску. То же самое происходит, если уровень в баке-накопителе больше 50%. Если уровень в баках нормальный, то начинается запуск узла. Главными аппаратами узла являются ершовый смеситель и осветлитель. В ершовом смесителе смешиваются NaOH с концентрацией 5% и НАО. В осветлителе происходит осаждение некоторых нуклидов и, следовательно, понижение активности отходов. На выходе ершового смесителя получается осветленный раствор, водородный показатель pH которого должен быть от 10 до 11 единиц. Уровень pH регулируется расходом NaOH при помощи задвижки с

электроприводом. Расход  $\text{H}_2\text{O}_2$  зависит от уровня заполнения бака-сборника осветленного раствора [3], [6]. Схема узла представлена на рис. 3.

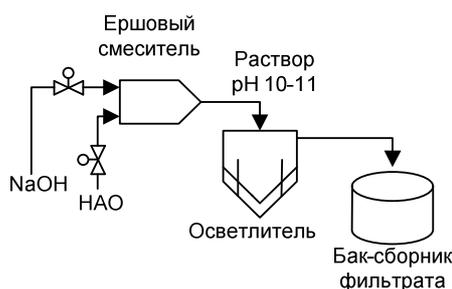


Рис. 3. Упрощенная схема узла коагуляции

Задвижками управляют два независимых регулятора на нечеткой логике [1], [6]. Регулятор  $\text{H}_2\text{O}_2$  управляет процентом открытия задвижки  $\text{H}_2\text{O}_2$  в зависимости от уровня раствора в баке-накопителе. Регулятор  $\text{NaOH}$  управляет процентом открытия задвижки  $\text{NaOH}$  в зависимости от уровня  $\text{pH}$  на выходе ершового смесителя. При заполнении бака, обе задвижки закрываются, и узел переходит в режим неготовности по уровню в баке-сборнике.

Система управления узлом выпарки также запускается по команде оператора и обрабатывает алгоритм готовности по баку-накопителю осветленного раствора, уровню в баке с очищенной водой и баке-сборнике конденсата сокового пара.

Система управления процессом выпарки предназначена для осуществления процесса выпаривания ЖРО по команде оператора. При получении команды оператора система управления узлом проверяет на готовность предыдущий узел, узел коагуляции, и готовность текущего узла, только после этого запускает вторую стадию переработки. В проверку на готовность узла выпарки входят такие параметры как наличие оборотного водоснабжения, уровень в баке с флегмой выше предельной минимальной уставки, температура всех теплообменников, температура и давление греющего пара.

При пуске одновременно начинается нагревание кипятильника и подача флегмы на тарелки. После того как температура нагревателя поднимется до рабочего значения, АСУ постепенно увеличивает расход осветленного раствора, пропуская его через два подогревающих теплообменника и постепенно доводя уровень в выпарном аппарате до рабочего значения [3]. При выпаривании ЖРО образуется соковый пар, который дочищается, проходя через тарелки выпарного аппарата. Далее, конденсируясь на охлаждающих теплообменниках, соковый пар переходит в конденсат сокового пара и накапливается в баке накопителе.

Система управления узлом ионообменных фильтров предназначена для управления последней стадией переработки ЖРО, а именно перекачать конденсат сокового пара через ионообменные фильтры с анионитом и катионитом.

Также как и предыдущие системы, после команды оператора АСУ проверяет готовность текущего и предыдущего узла. Затем начинается перекачка из бака-накопителя конденсата сокового пара в бак-сборник очищенной воды через ионообменные фильтры.

## Результаты разработки

В результате разработки автоматизированной системы управления и моделировании технологического процесса были получены следующие результаты:

- высокая адекватность модели технологического процесса;
- при проверке системы управления по критериям Михайлова, было выявлено, что система устойчива;
- отклонения всех параметров, которые контролировались АСУ ТП, не превышали 0,01%;
- идеально отработали все защиты и готовности технологического процесса, включая защиты насосов и самой станции;
- защита выпарного аппарата при срабатывании сигнала «Пена в аппарате» не позволила загрязнить более одной тарелки аппарата, что, в соответствии с технологическим регламентом, допустимо;
- человеко-машинный интерфейс (HMI) АСУ ТП был признан простым и понятным как для главного инженера, так и для оператора процесса дезактивации.

Пример HMI интерфейса представлен на рисунках 4,5,6.

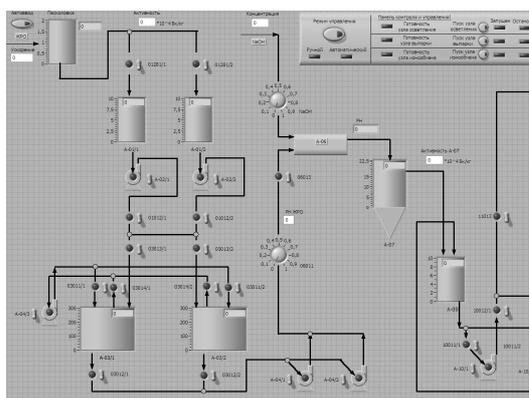


Рис. 4. Интерфейс узла приема и узла коагуляции

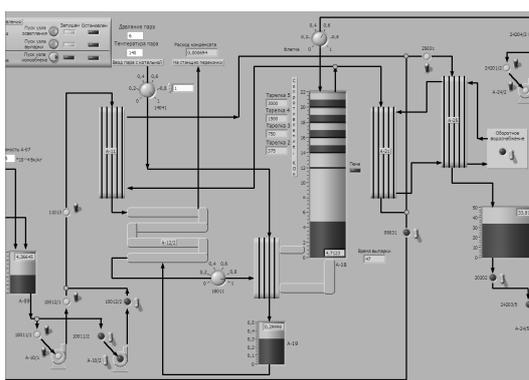


Рис. 5. Интерфейс узла упаривания ЖРО

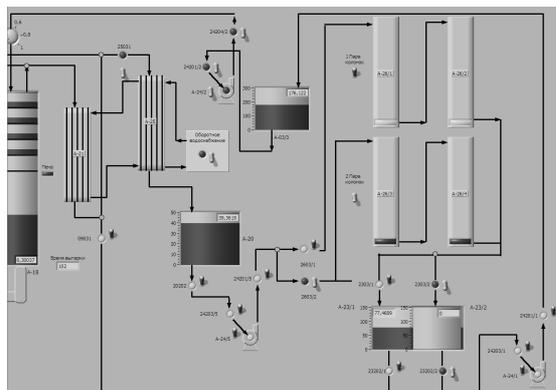


Рис. 6. Интерфейс узла ионообменных фильтров

Исходя из вышеперечисленных результатов можно сказать, что внедрение автоматизированной системы управления на основе искусственного интеллекта являются обоснованным и приемлемым.

### Список литературы

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166с.
2. Гостев В.И. Нечеткое управление в системах автоматического регулирования. –К.: «Радиоматор», 2008.-972 с.
3. Круглов В. В. Дли М. И. Голунов Р. Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. 221с.
4. Технический регламент переработки жидких радиоактивных отходов на станции спецводоочистки цеха дезактивации (корпус 26) ПИЯФ РАН, от 12.10.1995.-31с.
5. Рабочие инструкции по эксплуатации станции спецводоочистки цеха дезактивации ПИЯФ РАН, от 17.03.1995.-58с.
6. Uziel Sandler, Lev Tsitolovsky Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic. Springer, 2008. – 478 с.

## АЛГОРИТМ ДВОЙНОГО НАИЛУЧШЕГО ОТВЕТА В ИГРЕ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТИ

### Аннотация

Рассматривается игра формирования сети из  $n$  игроков. Каждый игрок стремится связаться с как можно большим числом игроков через цепочки двупольных связей, неся затраты на свои исходящие связи. Исследуется алгоритм двойного наилучшего ответа игроков на действия оппонентов.

### Введение

Игру формирования сети можно определить как игру (конфликтное взаимодействие целенаправленных игроков), в результате которой между игроками возникает набор связей (см. обзор [1]). Различные задачи на сетях рассматривались и ранее, в работе Джексона и Волински [5] появилось одна из первых попыток оформить задачу в игровой постановке.

Игры формирования сетей возникают в результате попыток описать как процессы возникновения связей в коммуникациях, торговых сетях, в экономических и социальных системах, а также задачах создания децентрализованных алгоритмов формирования сетей связи в технических системах.

Данная работа посвящена некоторым свойствам алгоритма поведения узлов, основанного на двойном наилучшем ответе на предыдущие действия оппонентов. Идея такого алгоритма впервые предложена в [2].

### Игра формирования сети

Имеется множество игроков  $N = \{1, \dots, n\}$ , игроки ассоциируются с узлами сети.

Каждый игрок выбирает тех, с кем он хочет быть связан:  $x_i \subseteq N$ ,  $x_i$  – действие игрока  $i$ . Обозначим через  $x$  ситуацию игры:  $x = (x_1, \dots, x_n)$ , а через  $x_{-i} = (x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$  – обстановку для  $i$ -го игрока.

Своими действиями игроки формируют граф (сеть)  $G(x) = \{N, E(x)\}$ , где  $E(x)$  – множество ребер графа при действиях  $x$ , определяется следующим образом: ребро  $\{i, j\}$  между игроками  $i$  и  $j$  принадлежит графу  $G(x)$ , если  $j \in x_i$  и  $i \in x_j$ .  $E_i(x) = \{ \{i, j\} \in E(x) \}$  – инцидентные  $i$  ребра  $G(x)$ .

Обозначим через  $E = \{ \{i, j\} \mid i, j \in N \}$  – множество всех возможных ребер, через  $G = \{N, E\}$  – полный граф игры.

Имеется инъективная функция весов ребер  $w : E \rightarrow R^+ : \forall e, g \in E, e \neq g \Rightarrow w(e) \neq w(g)$ . Определим функцию веса подмножества ребер:

$$\forall y \subseteq E: w(y) = \sum_{e \in y} w(e)$$

Целевые функции игроков  $\varphi_i$  отражают стремление к связности сети:

$$\varphi_i(x) = M f_i(x) - w(x_i), \quad (1)$$

где  $f_i(x)$  – количество игроков, с которыми связан игрок  $i$  в графе  $G(x)$  напрямую или через цепочку рёбер;  $M = \max_{e \in E} w(e)$ .

Порядок выбора игроками своих действий для изложенных в работе утверждений не важен, примем только, что в первые  $\phi$  шагов игры, выбор делают все игроки, при этом на каждом шаге минимум один игрок; затем эти  $\phi$  шагов повторяются – будем называть их периодом.

Игра останавливается и сеть считается сформированной, если в очередной период игроки, в соответствии с их принципами поведения, не изменили своих действий относительно предыдущего периода. Пусть  $x^t$ ,  $x_i^t$  – действия всех игроков и действия игрока  $i$  на шаге  $t$  соответственно.

### Модель поведения «Двойной наилучший ответ»

Определим модели поведения «наилучший ответ» и «двойной наилучший ответ».

Определение 1. Действие  $x_i^t$  игрока  $i$  на шаге  $t$  является наилучшим ответом, если он делает выбор действия на этом шаге и:

$$x_i^t = BR_i(x^{t-1}) = \arg \max_{y \subseteq N} \varphi_i(y, x_{-i}^{t-1}),$$

Определение 2. Действие  $x_i^t$  игрока  $i$  на шаге  $t$  является двойным наилучшим ответом, если он делает выбор действия на этом шаге и:

$$x_i^t = BR_i^2(x^{t-1}) = \arg \max_{y \subseteq N} \varphi_i(y, BR_{-i}(y, x_{-i}^{t-1})),$$

где  $BR_{-i}(x) = (BR_1(x), \dots, BR_{i-1}(x), BR_{i+1}(x), \dots, BR_n(x))$ .

То есть игрок, выбирающий двойной наилучший ответ, выбирает действие, которое будет наилучшим ответом с учётом реакции на это действие (одновременно всех) его оппонентов.

Определение 3. Пусть  $x_i \subseteq N$  – действие  $i$ -го игрока, определим  $E_i(x_i) = \{ \{i, k\} \mid k \in x_i \}$  – рёбра которые хочет создать своим действием  $i$  игрок.

Определение 4. Пусть  $x$  – ситуация игры. Определим множество действий игрока  $i$ , оставляющее связным весь граф, при условии, что рёбра, которые он хочет создать, будут созданы вне зависимости от действий оппонентов:

$$L_i(x) = \{ y \subseteq N \mid (N, E_i(y) \cup E((\emptyset, x_{-i}))) - \text{связный граф} \}$$

Определение 5. Действие  $i$ -го игрока –  $x_i$  – рационально-связно в обстановке  $x_{-i}$ , если

$$x_i = \arg \min_{y \subseteq L_i(x)} w(y).$$

Связь определения 5 с целью работы показывает утверждение 1.

Утверждение 1. Действие двойного наилучшего ответа – рационально-связно.

Утверждение 1 показывает смысл поведения «двойной наилучший ответ»: такой игрок  $i$  образует связь с игроком  $j$ , зная, что  $j$ -му игроку выгодно поддержать её, если это единственный путь к связи с  $i$ .

Зададимся целью найти максимум суммы целевых функций игроков (1). Нетрудно показать, что максимум будет достигаться на дереве, содержащем всех игроков в качестве своих вершин и таком, что суммарный вес его рёбер является минимальным – это т.н. минимальное покрывающее (остовное) дерево [3] – *Minimum Spanning Tree (MST)*.

Известны результаты [3], что *MST* существует для любого связного графа и единственно в случае попарно различных весов ребер. В силу инъективности  $w(\cdot)$ , это утверждение верно для произвольного графа  $G(x)$ .

Пусть в построенной игре все игроки действуют рационально-связно, обозначим такую динамику – РС, тогда верно

Утверждение 2. РС динамика останавливается на *MST*.

Утверждение 2 говорит об остановке РС динамики на *MST*. С другой стороны интересно, на каких вообще графах может остановиться такая динамика?

Утверждение 3. Если РС динамика остановилась на  $G(x) = \{N, E(x)\}$ , то

1.  $x_i = E^i(x)$
2.  $G$  – покрывающее дерево.

Таким образом, РС динамика может остановиться не только на *MST*, но на произвольном покрывающем дереве.

Следующее утверждение говорит о том, насколько неэффективным может быть дерево, на котором может остановиться РС-динамика.

Утверждение 4. РС динамика может остановиться на сколь угодно дереве неэффективном дереве.

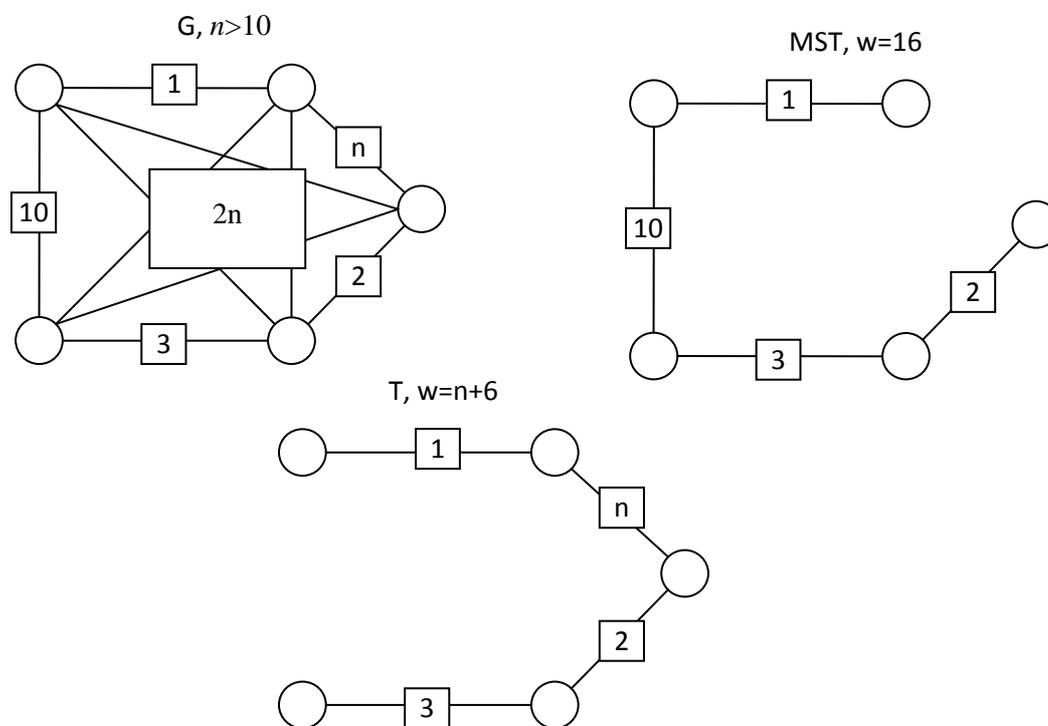


Рис. 1. Примеры для доказательства утверждения 4

Доказательство утверждения 4 следует из рис. 1. Рассматривается игра 5 игроков с заданными на  $G$  весами (каждое ребро «внутри» фигуры имеет вес  $2n$ ).  $MST$  для игры имеет вес 16, в то время как покрывающее дерево  $T$ , на котором при некоторой последовательности ходов может остановиться РС динамика, имеет вес  $(n+6)$ , что говорит о том, что РС динамика может привести к графу с весом, сколь угодно большим веса  $MST$ .

### **Выводы**

Алгоритм двойного наилучшего ответа показывает некоторые полезные свойства (связность, остановка на деревьях), далее необходимо проверить его сходимости для произвольных или некоторых последовательностей шагов игроков в периоде.

Отдельная проблема – высокая сложность предложенного алгоритма, в связи с необходимостью считать наилучшие ответы оппонентов. В то время как, например, среди известных децентрализованных алгоритмов поиска  $MST$  наилучшая оценка составляет  $O(D + \sqrt{n} \log n)$  [4], где  $D$  – диаметр сети.

Интерес представляет теоретическое исследование алгоритма двойного наилучшего ответа в практической задаче, рассмотренной в [2], в которой добавляются некоторые ограничения на игру формирования сети.

### **Список литературы**

1. Губко М.В. Управление организационными системами с сетевым взаимодействием агентов. Часть 1. Обзор теории сетевых игр. // Автоматика и телемеханика. №8. 2004. С. 115-132.
2. Базенков Н.И. Рефлексия в задаче управления топологией беспроводной сети / Труды 55-й научной конференции МФТИ. Радиотехника и кибернетика. Том 1. – М.: МФТИ, 2012. – сс. 46-48.
3. Eisner J. State-of-the-art algorithms for minimum spanning trees / A tutorial discussion. URL <http://cs.jhu.edu/~jason/papers/#ms97>, manuscript available online (78 pages), University of Pennsylvania. 1997.
4. Garay J.A., Kutten S., Peleg D. A sub-linear time distributed algorithm for minimum-weight spanning trees // SIAM Journal on Computing, pp. 302-316, 1998.
5. Jackson M.O., Wolinsky A. A Strategic Model of Social and Economic Networks // J. Econom. Theory. 1996. N 71. P 44–74.

## **ОПЕРАТИВНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАСТУПЛЕНИЯ ОТКАЗОВ В РАБОТЕ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

### **Аннотация**

В работе предложен метод оперативного прогнозирования наступления отказов в работе нефтепромыслового оборудования основанный на сочетании подходов иерархических нейронных сетей и рекурсивного фильтра Калмана.

### **Введение**

Проведенный анализ классических методов прогнозирования в условиях поставленной задачи определения типов состояний нефтепромыслового оборудования, показал, что методы, основанные на применении нейросетевых подходов, являются наиболее эффективными в данной задаче.

В результате анализа всех основных известных нейропарадигм, был сделан вывод, что для решения поставленной задачи прогнозирования состояния нефтепромыслового оборудования с целью предупреждения наступления отказов в работе нефтепромыслового оборудования целесообразным является применение нейропарадигмы в виде иерархической нейронной сети, обучаемой с использованием эволюционного подхода и метода обратного распространения ошибки.

Однако применение классических нейросетевых методов и алгоритмов в чистом виде для решения задачи классификации состояний осложняется рядом факторов, характеризующих функционирование объектов нефтепромысла, таких как: проблема продолжительного времени обучения нейронной сети, высокая зашумленность исторических (ретроспективных) данных, используемых для обучения нейронной сети, а также противоречивость входных оперативных данных.

Для решения данных проблем в работе предложен новый метод нейросетевой обработки информации о наступлении отказов в работе нефтепромыслового оборудования, на основе иерархической архитектуры искусственных нейронных сетей. Использование иерархии значительно расширяет известные и широко освещенные возможности существующих искусственных нейронных сетей.

### **Материалы и методы исследования**

Слоистые нейронные сети прямого распространения используются во многих предметных областях [2, 3] благодаря способности обучения и обобщения исходных данных. Большую роль в этом играет существование эффективных алгоритмов обучения, из которых наиболее известным является алгоритм обратного распространения ошибки, основанный на градиентном методе поис-

ка экстремума и использующий свойство нейронных сетей быстро вычислять производные по своим параметрам [2, 3].

Постоянно растущая сложность прикладных задач (таких как обработка диагностических данных, характеризующих работу нефтепромыслового оборудования в определенный момент времени), нелинейное увеличение объемов данных и их размерности, оставляют актуальной задачу повышения эффективности алгоритмов, используемых для обучения нейронных сетей. При практическом использовании последних неизбежно возникает вопрос выбора структуры сети. Основной задачей становится не просто обучение, а нахождение нейронной сети, наилучшим (в некотором смысле) образом решающей поставленную прикладную задачу. Существует ряд методов нахождения такой сети, основанных на эмпирическом исследовании [2, 4]. Использование этих методов в основном предполагает, что обучение является операцией в решении задачи оптимизации структуры сети. В таком случае потребность в быстром обучении еще больше возрастает [8].

Основной идеей при прогнозировании состояния нефтепромыслового оборудования является сочетание подходов иерархических нейронных сетей (ИНС) [5] и рекурсивного фильтра Калмана [9-11]. За счет использования архитектуры ИНС возможно сократить размерность входных данных для фильтра Калмана. На рисунке 1 представлена основная идея предлагаемого метода оперативного прогнозирования наступления отказов в работе нефтепромыслового оборудования с помощью ИНС.

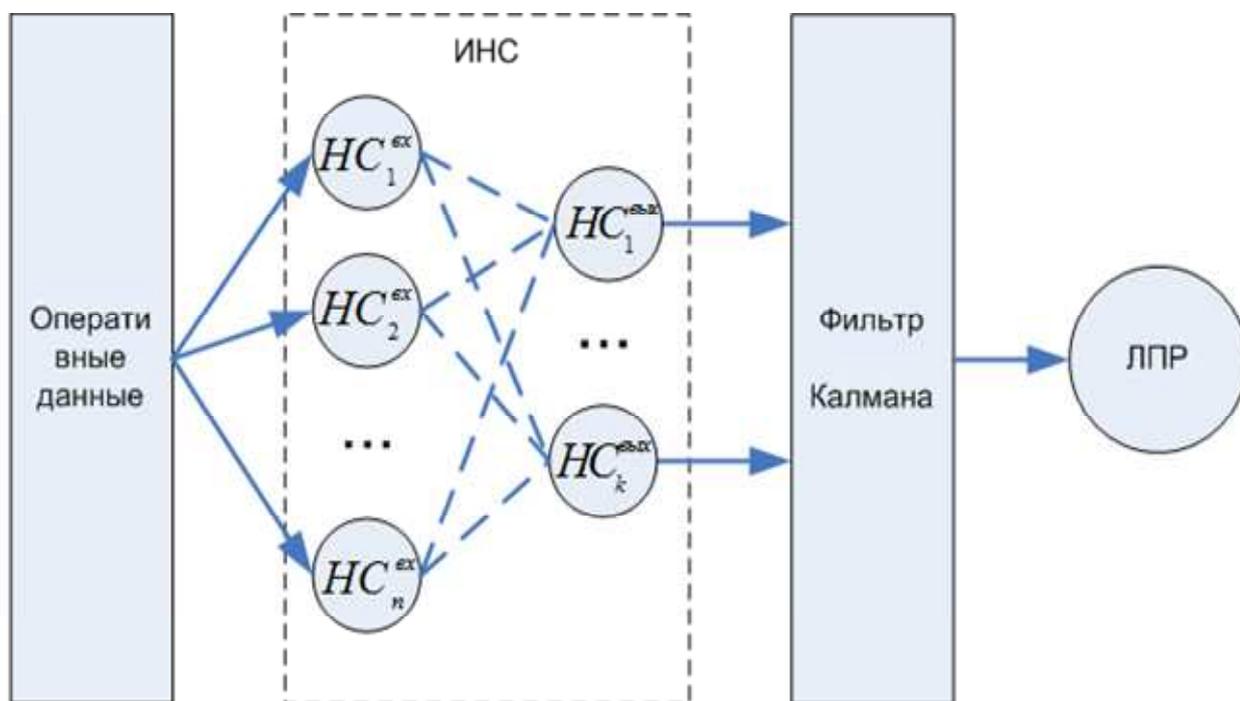


Рис. 1. Основная идея предлагаемого метода оперативного прогнозирования наступления отказов в работе нефтепромыслового оборудования с помощью ИНС

Оперативные данные содержат входной набор  $n$ -состояний нефтепромыслового объекта. Каждая нейронная сеть  $НС_i^{6x}$ ,  $i \in 1..n$  обучается на «поиск своей неисправности». В режиме реального времени данные о режимах состоянии объекта управления подаются на входы всех НС, и параллельно обрабатываются. Структура ИНС устроена таким образом, чтобы результат распознавания всех входных НС попадал на выходные нейронные сети  $НС_i^{6bx}$ ,  $i \in 1..k$ , предназначенные для предварительной обработки данных и передаче на фильтр Калмана [6].

На практике часто возникает потребность построения различных типов математических моделей, позволяющих на основе данных наблюдений получать прогнозные значения для параметров технических систем. Такой математический аппарат развит в достаточной степени хорошо. При этом известно, что методы прогнозирования разделяются на экспертные, аналитические и комбинированные.

Экспертные прогнозы даются экспертами в той или иной области деятельности и являются эвристическими.

Для построения аналитического прогноза используется формальный математический подход. То есть, создается математическая модель, отображающая процесс, поведение которого необходимо прогнозировать. После того, как модель получена, она используется для прогнозирования поведения того процесса, который она отражает. Со временем математическая модель может корректироваться [1], чтобы лучше отражать действительность. Иногда на практике корректируется не модель, а прогнозируемая оценка [7]. Подобный подход часто используется в широко известном аппарате фильтра Калмана [9].

Если представим модель временного ряда в терминах пространства состояний дискретного вида [10], то можно поставить следующую задачу: оценить характеристики шумов динамики и измерителя, а также разработать алгоритм, позволяющий в режиме реального времени получать прогнозные и фильтрационные оценки. При этом предлагается использовать адаптивный алгоритм фильтра Калмана, чтобы иметь возможность корректировать прогнозные оценки на основе данных текущих наблюдений с целью получения фильтрационных оценок состояния [9].

### **Результаты исследования**

В работе предложен метод нейросетевой обработки информации о наступлении отказов в работе нефтепромыслового оборудования, на основе иерархической архитектуры искусственных нейронных сетей.

Особенность процедуры прогнозирования состоит в том, что уровни временных рядов рассматриваются как значения выхода измерителя динамической системы, описываемые в терминах пространства состояний. При этом процедура предполагает решение задачи идентификации характеристик фильтра Калмана, в частности математического ожидания и дисперсии помех динамики [6], а так же дисперсии шумов измерителя. Решение задачи идентификации харак-

теристик фильтра Калмана, оценок прогнозирования и фильтрации осуществляются в режиме реального времени.

### **Заключение**

За счет использования иерархической структуры нейронной сети возможно уменьшить количество входных параметров для итеративного алгоритма Калмана, в результате чего возможно снизить вычислительную сложность разрабатываемых систем оперативного прогнозирования наступления отказов в работе нефтепромыслового оборудования на основе предлагаемого подхода, что позволит разрабатывать системы онлайн мониторинга реального времени.

### **Список литературы**

1. Безручко Б.П., Смирнов Д. А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. — Саратов: ГосУНЦ "Колледж", 2005. — ISBN 5-94409-045-6
2. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере // Новосибирск.: Наука, 1996. 276с.
3. Ежов А.А., Шумский С.А. Нейрокомпьютинг и его применения в экономике и бизнесе // М.: МИФИ, 1998.
4. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика // М.: Горячая линия–Телеком, 2001. 328с
5. Ланкин Ю.П., Хлебопрос Р.Г. Экологические основания концепции самоадаптирующихся сетей и систем с поисковым поведением // Инженерная экология. – 2001. – № 2. – С. 2-26.
6. Перов, А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. — М.: Радиотехника, 2003. — 400 с. — ISBN 5-93108-047-3
7. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. — 2-е изд., испр. — М.: Физматлит, 2001. — ISBN 5-9221-0120-X
8. Шустов В.А. Алгоритмы обучения нейронных сетей распознаванию изображений по равномерному критерию // Компьютерная оптика, 2007. № 14. -С. 183-189
9. Ingvar Strid & Karl Walentin (2009), "«Block Kalman Filtering for Large-Scale DSGE Models»", Computational Economics (Springer). — Т. 33 (3): 277–304
10. Martin Møller Andreasen (2008), «Non-linear DSGE Models, The Central Difference Kalman Filter, and The Mean Shifted Particle Filter»
11. Roweis, S. and Ghahramani, Z., A unifying review of linear Gaussian models, Neural Comput. Vol. 11, No. 2, (February 1999), pp. 305—345.

## **СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРОВ ВОДО-ВОДЯНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ**

### **Аннотация**

В данной работе предложен метод автоматизированной идентификации номеров тепловыделяющих сборок, основанный на использовании технологии искусственных нейронных сетей. На базе предложенного метода разработано программное обеспечение системы поддержки принятия решений операторов водо-водяного энергетического реактора.

### **Введение**

Для выполнения требований по обеспечению безопасности эксплуатации АЭС с реакторами типа водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), повышения надежности и эффективности их работы служат плановые профилактические работы, проводимые ежегодно на каждом из работающих энергоблоков. Эти профилактические работы, называемые планово-предупредительным ремонтом (ППР), являются обязательным этапом производственной деятельности всех АЭС с реакторами типа ВВЭР. Во время проведения ППР производится остановка реактора АЭС, влекущая за собой значительные финансовые потери.

Одной из основных процедур ППР является процедура идентификации номеров тепловыделяющих сборок (ТВС). Необходимость проведения процедуры идентификации номеров ТВС определена требованием регламента эксплуатации активной зоны реактора АЭС [2, 8] по контролю за перемещением ядерного топлива согласно картограмме загрузки активной зоны реактора и проверке фактического соответствия номеров ТВС и их абсолютных координат. В зависимости от года эксплуатации ТВС, а также состояния ТВС каждый ППР ТВС необходимо переставлять, а также заменять отработавшие ТВС для обеспечения более равномерного выгорания и распределения энерговыделения по объёму активной зоны. По техническим требованиям эксплуатации активной зоны ВВЭР [8] в результате проведения процедуры идентификации номеров ТВС должно быть установлено визуальное соответствие физической загрузки ТВС в реакторе с картограммой данной загрузки. Для уточнения данных об инвентарных номерах ТВС, установленных в активной зоне реактора, и приведения в соответствие с ними данных о ТВС, содержащихся в БД, производится операция идентификации номеров ТВС.

### **Материалы и методы исследования**

В настоящее время для проведения процедуры идентификации номеров ТВС оператор перемещает машину перегрузочную (МП) с установленной телевизионной камерой (ТК) по заданному маршруту с остановкой в указанных

точках. В каждой точке останова МП группой операторов (3 - 4 оператора) производится зрительное распознавание номеров ТВС на экране монитора и запись увиденных номеров в протокол идентификации. Это операция занимает от 4 до 5 часов времени ППР, а также оказывает большую нагрузку на операторов, что приводит к возникновению проблемы так называемого "человеческого фактора".

Время идентификации номеров ТВС можно значительно сократить за счет автоматизации процедуры определения номеров на основе изображений, получаемых от штатной ТК МП. Однако, номера ТВС на изображениях, получаемых ТК МП, расположены под произвольным углом относительно горизонта, а также трудно читаемы на фоне корпуса ТВС, в связи с чем, существующие подходы распознавания текстовой информации на изображении [1, 3], неприменимы в задаче идентификации номеров ТВС. Для обеспечения высокого качества распознавания номеров ТВС необходимо провести улучшение качества изображения и сегментацию текстовых областей. После этого возможно осуществить непосредственное распознавание текстовой информации на сегментированных областях [6]. Таким образом, предлагаемый метод автоматизированной идентификации номеров ТВС [7], состоит из следующих этапов:

- калибровка телевизионной камеры;
- улучшение качества изображения;
- устранение оптических искажений;
- сегментация текстовой области номера ТВС;
- выделение символов номера ТВС;
- распознавание символов номера ТВС.

Рассмотрим более подробно этап распознавания символов номера ТВС, для этого можно использовать однослойную нейронную сеть (НС), обучаемую при помощи метода обратного распространения ошибки (back propagation) [5]. Выбор архитектуры НС обусловлен спецификой задачи распознавания символов номера ТВС, т.к. в задаче распознавания символов известна классификация учебных данных, т.е. для каждого различного символа номера ТВС возможно составить выборку обучающих примеров.

Учитывая размер входного изображения, размер входного слоя нейронной сети составляет 400 элементов, каждый из которых принимает значение в диапазоне [0, 1]. Скрытый слой имеет длину 200 элементов (длина скрытого слоя подбирается опытным путем, рекомендуется выбирать длину 30-50% от числа элементов входного слоя [5]) и выходной слой, который состоит из 11 элементов. Длина выходного слоя обусловлена количеством различных символов, из которых состоит номер ТВС; в задаче идентификации номеров ТВС их 11 [0, 9] и [N]. На рисунке 1 изображена архитектура нейронной сети, предложенной для решения задачи распознавания символов номера ТВС:

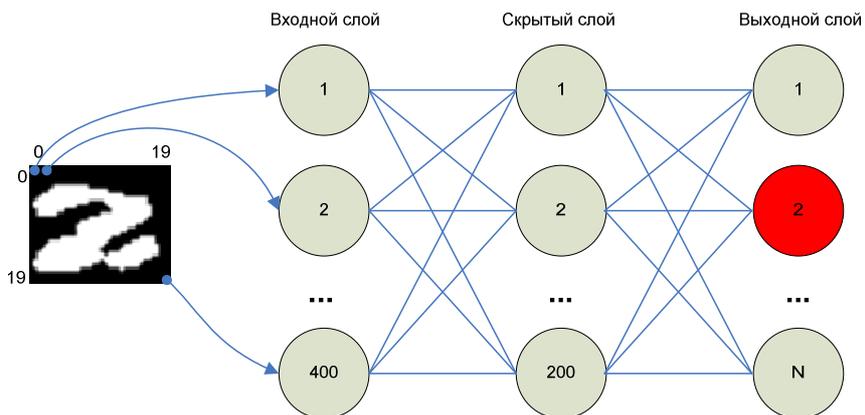


Рис. 1. Архитектура НС, предложенной для решения задачи распознавания символов номера ТВС

Согласно классическому подходу предварительно НС должна быть обучена методом обратного распространения ошибки на наборе, полученном из реальных фрагментов изображений активной зоны реактора ВВЭР. Каждый выделенный символ детектирован оператором и поставлен в соответствие с цифрой 0-9 либо латинской буквой «N». Обучающий набор содержит 20 изображений для каждой цифры и латинской буквы «N», соответственно, размерность обучающего набора  $N = 11 \cdot 20 = 220$  образцов.

### Результаты исследования

На основе предложенного метода автоматизированной идентификации номеров ТВС разработано ПО системы поддержки принятия решений операторов ВВЭР, предназначенное для идентификации инвентарных номеров ТВС, находящихся в водной среде в активной зоне реактора типа ВВЭР, путем обработки изображений, получаемых от штатной ТК МП. На рисунке 2 представлена экранная форма работающей системы поддержки принятия решений операторов ВВЭР:

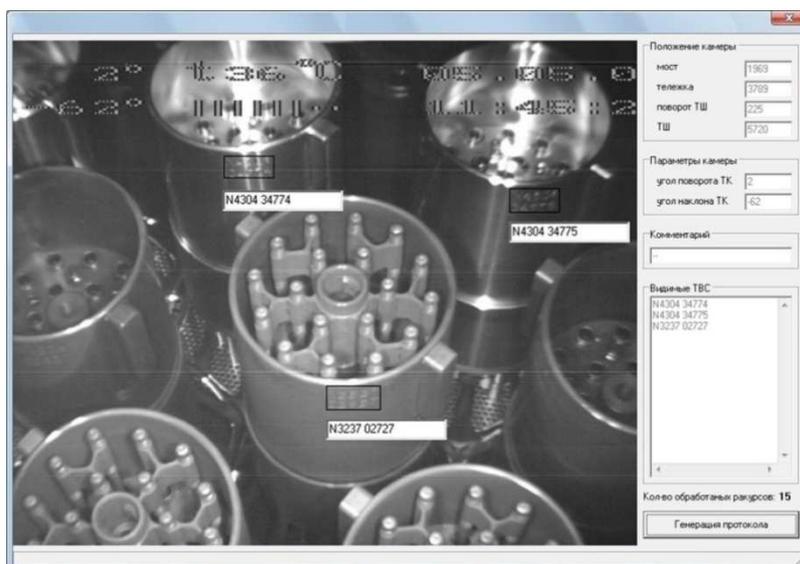


Рис. 2. Экранная форма ПО системы поддержки принятия решений операторов ВВЭР

Работоспособность разработанной системы поддержки принятия решений операторов ВВЭР испытана на энергоблоке №1 РоАЭС в процессе ППР 2011 года. Как показали результаты испытаний количество правильно идентифицированных номеров ТВС по изображениям активной зоны реактора за ППР 2011 года составило 89% от общего числа рассмотренных номеров ТВС, в связи с этим, разработанное ПО может использоваться в задаче идентификации номеров ТВС в качестве контекстной помощи оператору.

### **Заключение**

В работе предложен метод автоматизированной идентификации номеров ТВС на основе обработки одноракурсных изображений, получаемых от штатной телевизионной камеры мехатронного комплекса МП ВВЭР. На основе метода, предложенного в работе, создано ПО системы поддержки принятия решений операторов ВВЭР.

### **Список литературы**

1. Алейкин, В.В. Распределенная система распознавания текстовой информации [Текст] / В.В. Алейкин // Автореферат канд. тех. наук. – М., – 2006. – 17 с.
2. Андрушечко, С.А. АЭС с реактором типа ВВЭР - 1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта [Текст] / С.А. Андрушечко, А.М. Афонов, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, В.Ф. Украинцев / М.: Логос, – 2010. – 604 с.
3. Визильтер, Ю.В. Технология автоматического считывания символьной информации / Ю.В. Визильтер, А.В. Бондаренко // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. – №9.
4. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы: Учебное пособие [Текст] / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик / М.: Физматлит, 2006. – С. 98-106.
5. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей [Текст] / Р. Каллан / М.: Вильямс, – 2003. – С. 132-140.
6. Коробкин В.В., Коровин Я.С., Хисамутдинов М.В. Разработка и исследование методов и алгоритмов создания интеллектуальных функциональных компонентов отказоустойчивых распределенных информационно-управляющих систем (РИУС) // Отчет о выполнении НИР (№г/р 01200953310) в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала научной школы (2009-2010)»
7. Хисамутдинов, М.В. Распознавание номеров изделий ТВС в активной зоне реактора [Текст] / М.В. Хисамутдинов // Материалы международной IX научно-технической конференции “Распознавание-2010” Курск, – 2010. – С. 79-81.
8. Международное агентство по атомной энергетике. МАГАТЭ. [Сайт] / URL: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Main/index.html>(дата обращения: 5.03.2013).

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТИЗНОЙ ПРОДУКЦИИ**

### **Аннотация**

Рассмотрен процесс формирования показателей качества в многооперационных процессах производства металлических изделий. Предложена методика оценки сквозной технологии на основе критерия неопределенности производственной системы, как энтропия.

Производство металлических изделий является многооперационным процессом и базируется на использовании энергозатратных технологических операций (холодная пластическая деформация, горячая пластическая деформация, термическая обработка, химические методы и др.), на которых идет основной прирост показателей качества, требуемых в готовой продукции. Формирование показателей качества зависит как от механических свойств и качества исходной заготовки, так и от технологических режимов, которые применяются на различных стадиях обработки. На каждой технологической операции показатели качества должны достигать определенного уровня и чем полнее соответствие данному уровню, тем результативнее технологическая операция с целью достижения заданных свойств продукции. Поэтому производство металлических изделий требует создание методики количественной оценки сквозной технологии многооперационных процессов, что позволит осознанно назначать технологические режимы и повысить результативность производства.

При разработке методики оценки сквозной технологии производства металлических изделий использовался принцип исследования качества технологического процесса, основанный на выявлении функций процесса в целом и отдельных его операций в частности. Каждая функция технологического процесса направлена на достижение определённого результата. Поэтому оценка по степени выполнения функции, т.е. по степени достижения результата названа результативностью, что не противоречит общепринятому в стандартах определению этого термина [1]. В качестве критерия оценки сквозной технологии была выбрана энтропия. Энтропия характеризует неопределенность характеристик технологии и качества. Чем меньше неопределенность технологического процесса, тем он результативнее в качестве получения готовой продукции с заданным набором потребительских свойств. Энтропия дает комплексную оценку производства не по одному какому-то показателю, а по кортежу показателей качества. Данная оценка применима для всего технологического процесса, так и отдельных ее операций [2].



Энтропия показателей качества исходной заготовки и готовой продукции, может определена, следуя А.Н. Колмогорову [3], по ковариационной матрице следующим образом:

$$H_0 = \ln \sqrt{\det R_Y^0}, \quad (6)$$

$$H_Y = \ln \sqrt{\det R_Y}, \quad (7)$$

где  $\det R_Y^0$ ,  $\det R_Y$  – определители ковариационных матриц (2,3).

Изменение энтропии показателей качества в процессе всей технологии производства определяется в виде:

$$\Delta H = \frac{H_Y - H_0}{H_0} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где  $H_0$  – энтропия показателей качества исходной заготовки;

$H_Y$  – энтропия показателей качества готовой продукции.

Уменьшение энтропии (8) свидетельствует о стабилизации технологии производства, снижении отклонения показателей качества относительно средних значений и тем самым показывает степень достижения заданному уровню показателей качества технологического процесса в целом.

В настоящей работе в качестве примера была проведена оценка сквозной технологии производства высокопрочной арматуры в условия ОАО «ММК-МЕТИЗ» г. Магнитогорск. В табл. 1 приведены результаты расчета по предлагаемой методики.

*Таблица 1*

*Энтропийная оценка сквозной технологии производства высокопрочной арматуры*

Марка стали	Энтропия $H_0$	Технология	Энтропия $H_Y$	$\Delta H$ , %
80ХФЮ	-7,5	15 мм→9,6 мм	-11,16	48,8
		15,5 мм→9,6 мм	-10,4	38,6
		16 мм→9,6 мм	-12,8	70,6
		15 мм→10 мм	-5,57	-25,7
		15,5 мм→10 мм	-5,46	-27,2
85ХФЮ	-7	15 мм→9,6 мм	-12,9	84,2
		15 мм→10 мм	-5,7	-18,5
85ФЮ	-7,1	15 мм→10 мм	-12,9	81,7
80Р	-5,64	15 мм→9,6 мм	-11,08	96,5

В результате реализации разработанной методики было установлено, что наибольшее благоприятное изменение показателей качества (уменьшение энтропии на 96%) обеспечивает технология производства высокопрочной арматуры (диаметр 9,6 мм) из стали 80Р с диаметром исходной заготовки 15 мм.

Следовательно изменение энтропии (6,7), определяемой по ковариационной матрице (2,3), отражает процессы изменения технологии в результате из-

менчивости начальных свойств заготовки (химический состав, начальные механические свойства), соблюдения технологии и т. п. Уменьшение энтропии говорит о благоприятной результативности технологии, снижении отклонения фактических значений показателей качества высокопрочной арматуры относительно средних значений, получении готовой продукции с заданным набором потребительских свойств. Рост энтропии, наоборот, свидетельствует о росте неопределенности и отклонений значений показателей качества. Уменьшение разброса значений показателей качества высокопрочной арматуры от каждой предыдущей технологической операции к последующей, говорит об уменьшении неопределенности, поэтому, накладывается требование минимизации энтропии, а именно:  $\Delta H \rightarrow \min$ .

Энтропийная оценка сквозной технологии производства металлических изделий является комплексной оценкой всех показателей качества готовой продукции. Энтропия показывает меру «отклонения» формируемых механических свойств в процессе производства, от заданного уровня. Чем меньше «отклонение», тем меньше энтропийный показатель, а следовательно результативнее процесс в качестве получения готовой продукции с заданным набором потребительских свойств. Данная оценка применима для всего технологического процесса, так и отдельных ее операций.

Использование данной методики позволит оценить неопределенность технологических операций или всего технологического процесса производства, выявить степень достижения запланированных показателей качества готовой продукции, осознанно назначать технологические режимы и повысить результативность производства.

Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 13.G25.31.0061), программы стратегического развития университета на 2012 – 2016 гг. (конкурсная поддержка Минобрнауки РФ программ стратегического развития ГОУ ВПО), а также гранта в форме субсидии на поддержку научных исследований (соглашение № 14.B37.21.0068).

### Список литературы

1. Рубин Г.Ш., Корчунов А.Г., Лысенин А.В.. Управление результативностью многооперационных технологических процессов // Управление большими системами: Материалы VIII Всеросс. школы-конф. молодых ученых. М., 2011. С. 327-331.
2. Управление качеством метизной продукции в условиях неопределенности технологической информации/ А.Г. Корчунов, А.В. Лысенин. // Вестник МГТУ им Г.И. Носова. 2012. № 3. С. 45 - 48.
3. Колмогоров А.Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987. -304 с.

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛА

### Аннотация

В работе рассматривается процесс резания как объект управления. В качестве выходной координаты процесса резания принимается температура в зоне резания металла. Разработана динамическая модель процесса резания в виде структурной схемы. Модель процесса резания содержит нелинейные (линеаризуемые) звенья. Выполнена линеаризация нелинейных звеньев. Составлена линеаризованная структурная схема процесса резания.

### Актуальность проблемы

Стабилизация температурного режима зоны резания благоприятно сказывается на динамике контактных процессов на поверхностях инструмента и детали, а через них – на уменьшении интенсивности износа инструмента и формировании поверхностной структуры деталей с меньшим уровнем дефектов. Таким образом, ведение процесса резания с обеспечением постоянства температуры резания при обработке позволяет резко повысить производительность обработки с одновременным получением деталей с высокими эксплуатационными свойствами, что предопределяет повышение ресурса работы наиболее ответственных деталей таких изделий, как авиадвигатели. [1]

### Модель процесса резания

Ведение процесса резания с обеспечением постоянства температуры невозможно без построения системы автоматического регулирования температуры в зоне резания (САРТ), так как процесс резания подвержен действию возмущений. САРТ невозможно построить без динамической модели процесса резания. Для выявления возмущений и определения входных параметров необходимо рассмотреть процесс резания как объект управления. Анализ процесса резания как объекта управления выполняется в несколько этапов.

1. Определяется выходная координата. Для САРТ выходной координатой является температура в зоне резания металла.

2. Определяется управляющее воздействие. Управляющее воздействие целесообразно определить по математическому описанию объекта управления.

3. Математическое описание объекта. Согласно [2], температура в зоне резания  $\theta$  описывается выражением:

$$\theta = C_{\theta} \cdot V^m \cdot S^n \cdot t_{\Pi}^q \cdot (\sin \varphi)^{n-q}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость резания,  $S$  – подача,  $t_{\Pi}$  – глубина резания,  $\varphi$  – главный угол в плане,  $C_{\theta}$  – коэффициент, зависящий от рода и механических свойств обраба-

тываемого материала, геометрических параметров инструмента и применяемой смазочно-охлаждающей жидкости. При любых видах обработки величины показателей  $m$ ,  $n$  и  $q$  неодинаковы.

Например, при точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР резцом ВК6М с параметрами заточки: радиус при вершине резца –  $r_B=1$ мм, передний угол  $\gamma=0^\circ$ , главный  $\alpha$  и вспомогательный  $\alpha_I$  задние углы  $\alpha=\alpha_I=10^\circ$ , главный  $\varphi$  и вспомогательный  $\varphi_I$  углы в плане  $\varphi=\varphi_I=45^\circ$ , оптимальная температура  $\theta_0=720^\circ\text{C}$ , эта взаимосвязь описывается выражением [3]:

$$\theta_0 = 267 \cdot V^{0,384} \cdot S^{0,132} \cdot t_{II}^{0,098}. \quad (2)$$

По уравнению (2) можно судить, что наиболее эффективное действие на температуру резания оказывает скорость резания, т.к. у нее самый высокий показатель степени. Следовательно, в качестве управляющей координаты целесообразно принять скорость резания  $V$ .

#### 4. Определение состава возмущений и входных параметров.

Кроме скорости резания на объект управления действуют величины подачи  $S$  и глубины резания  $t_{II}$ . Поэтому они также являются воздействиями на объект управления. В процессе резания величины  $S$  и  $t_{II}$  могут изменяться.

Величина подачи колеблется из-за перепадов напряжения в сети на (+10%...-15%) номинального значения. Пропорционально перепадам напряжения изменяется и подача. Принимается минимальное значение подачи за  $S_0$ . Изменение подачи –  $\Delta S$ . Величина  $S_0$  является неизменной, поэтому ее можно считать входным параметром. Величина  $\Delta S$  является возмущением. Таким образом, подача равна  $S = S_0 + \Delta S$ .

Глубина резания  $t_{II}$  может отклоняться от заданного значения  $t_{II0}$  на величину  $\Delta t_{II}$ .  $t_{II0}$  принимается как входной параметр,  $\Delta t_{II}$  принимается как возмущение. Таким образом  $t_{II} = t_{II0} + \Delta t_{II}$ .

#### 5. Определение отклонения выходной координаты при совместном действии возмущений.

Для постановки задачи разработки САРТ необходимо знать величину отклонения выходной координаты в разомкнутой системе. Поэтому, по модели определяется величина отклонения выходной координаты при совместном действии всех возмущений. Если отклонение выходной координаты больше допустимого значения, то необходимо ее регулировать, т.е. создать систему автоматического регулирования.

Таким образом, процесс резания как объект управления может быть представлен в виде функциональной схемы (рис. 1).

В соответствии с анализом процесса резания как объекта управления на основании уравнения (2), составлена нелинеаризованная структурная схема (рис. 2).

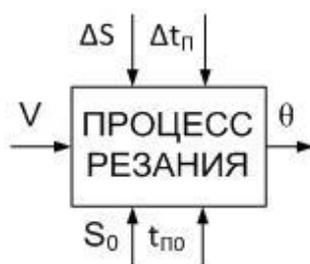


Рис. 1. Функциональная схема процесса резания как объекта управления

Структурная схема содержит ряд нелинейных элементов: степенные функциональные элементы (1ФП, 2ФП, 3ФП), блоки умножения (1БУ, 2БУ). Схема позволяет исследовать влияние управляющего воздействия  $V$  и возмущений  $\Delta t_{\pi}$ ,  $\Delta S$  на выходную координату  $\theta$ . Однако, пользоваться этой схемой для синтеза системы автоматического регулирования невозможно. Так как линейная теория автоматического управления позволяет работать только с линейными системами автоматического управления. Следовательно, элементы схемы (рис. 2) необходимо линеаризовать.

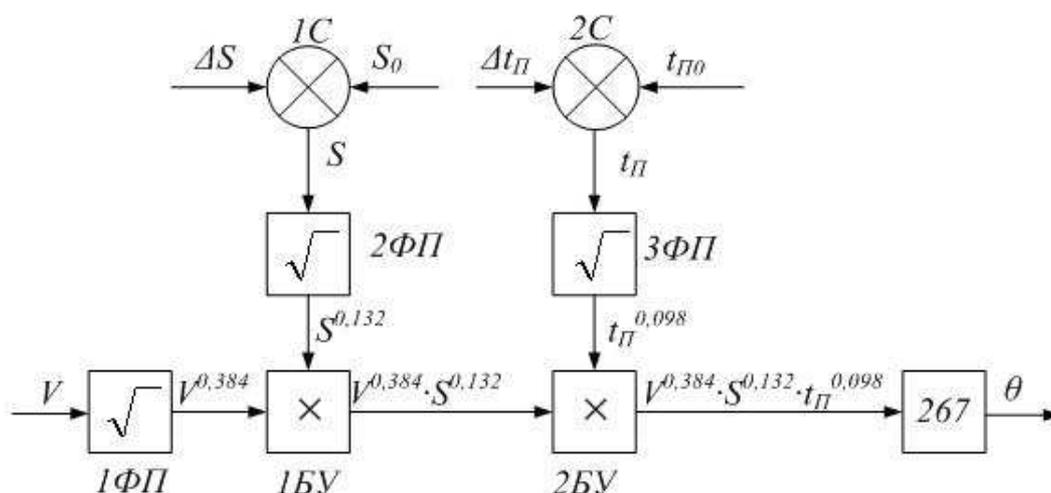


Рис. 2. Нелинеаризованная структурная схема процесса резания

### Линеаризация нелинейных элементов

Для линеаризации функциональных преобразователей необходимо найти рабочие точки, в которых будет осуществляться линеаризация. Для рабочих точек определить коэффициенты передачи этих звеньев. Если известно математическое описание этой кривой, то коэффициентом передачи в заданной точке будет являться первая производная этой функции в ряде Тейлора. Если кривая задана в виде графика, то необходимо в рабочей точке провести касательную и взять отношение приращения выходной координаты к соответствующему приращению управляющей координаты.

Для линеаризации блоков умножения используется метод малых приращений.

Линеаризованная структурная схема процесса резания как объекта управления представлена на рис. 3.

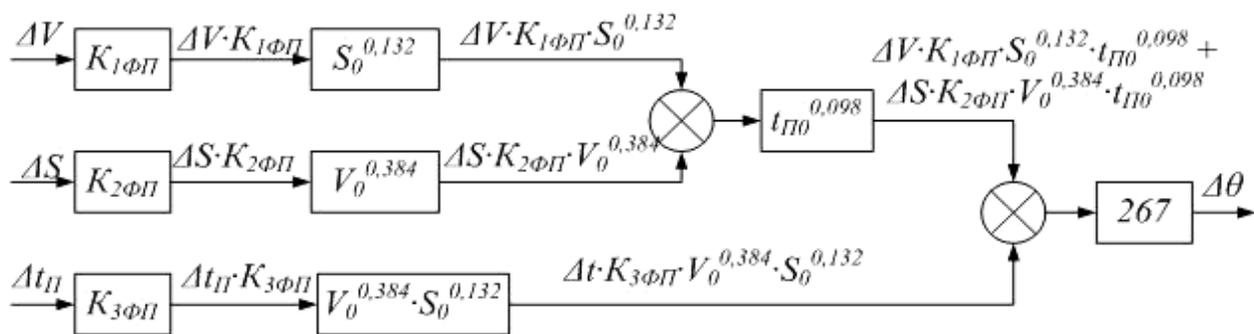


Рис. 3. Линеаризованная структурная схема процесса резания как объекта управления

### Выводы

1. Разработана динамическая модель процесса резания в виде нелинеаризованной структурной схемы (все переменные являются функцией времени). Нелинеаризованная структурная схема позволяет исследовать влияние изменения в широком диапазоне изменения технологических параметров на температуру резания в зоне резания металла.

3. Разработанная структурная схема может быть использована при разработке и моделировании САРТ.

4. Использование разработанной динамической модели позволит создать систему автоматического управления температурой резания по модели.

5. Произведена линеаризация нелинейной структурной схемы объекта, что позволит при построении замкнутой системы автоматического управления температурой резания выполнить анализ устойчивости системы и произвести синтез замкнутой системы автоматического управления температурой в зоне резания с заданными показателями качества.

6. Материал статьи может быть использован студентами при курсовом и дипломном проектировании, а также инженерами, разрабатывающими системы автоматического управления процессом резания металлов.

### Выражение благодарности

Автор благодарит доктора, профессора технических наук, Лютова Алексея Германовича и доцента, кандидата технических наук, Коурова Георгия Николаевича за ценные замечания при выполнении работы.

### Список литературы

1. Зориктуев, В. Ц. Автоматизация процессов резания на основе положения об оптимальной температуре резания// Вестник УГАТУ: УГАТУ, 2009, 0,0Т.12, № 4(33). С. 14–19
2. Солоненко, В.Г. Резание металлов и режущие инструменты: Учеб. пособие для вузов/ В.Г. Солоненко, А.А. Рыжкин. – 2-е издание, стер. – М.: Высш. шк., 2008. – 414 с.: ил.
3. Справочник технолога –машиностроителя В 2-х т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. - Т.1. – 5-е изд., перераб. и доп. – 2001. – 912 с.

## **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ С РАЗРЕЖЕННЫМИ МАТРИЦАМИ**

### **Аннотация**

В представленной работе рассмотрено уравнение теплопроводности и способ его решения методом конечных элементов, который позволяет найти вектор распределения температур через любой промежуток времени. В работе предлагается один из возможных способов ускорения вычислений за счет использования специальных алгоритмов, основанных на представлении разреженных матриц и операций над ними.

### **Актуальность задачи**

Во многих инженерных задачах важным аспектом является знание распределения температуры в теле, которое позволяет вычислить количество тепла подводимого к телу и теряемого им. Для решения подобного рода задач используются дифференциальные уравнения с частными производными, решаемые различными методами. Одним из наиболее распространенных является метод конечных элементов. Несмотря на все преимущества метода он не получил должного распространения в связи с тем, что требует больших вычислительных затрат.

### **Дискретизация области**

В МКЭ исходная задача заменяется дискретной конечномерной моделью. Для построения используются треугольники и четырехугольники.

Далее появляется задача нумерации узлов. Она непосредственным образом влияет на эффективность вычислений. При грамотном разбиении в матрице коэффициентов все ненулевые и некоторые нулевые коэффициенты находятся между двумя линиями, параллельными главной диагонали. Расстояние между ней и этими линиями называется шириной полосы матрицы. Уменьшение ширины полосы приводит к сокращению размеров требуемой машинной памяти. Ширина полосы  $B$  вычисляется по формуле:

$$B = (R + 1) \cdot Q \quad (1)$$

где  $R$  – максимальная по элементам величина наибольшей разности между номерами узлов в отдельном элементе,

$Q$  – число неизвестных в каждом узле[1].

При математическом описании элемента возникает необходимость в индивидуализации его узлов. С этой целью узлу присваивается индекс  $i, j$  или  $k$ .

## Двумерный симплекс-элемент

Метод конечных элементов основан на идее аппроксимации непрерывной функции (например, температуры) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе элементов. Чаще всего в качестве функции элемента применяется полином, порядок которого зависит от числа используемых в каждом узле элемента данных о непрерывной функции:

$$T^{(e)} = a_1 + a_2x + a_3y \quad (2)$$

Узловые значения скалярной величины  $T^{(e)}$  обозначаются согласно индексации через  $T_i$ ,  $T_j$  и  $T_k$ , а координатные пары трех узлов – через  $(X_i, Y_i)$ ,  $(X_j, Y_j)$ ,  $(X_k, Y_k)$ .

Решив систему  $T^{(e)} = a_1 + a_2x + a_3y$  получаем:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2A} [(X_j Y_k - X_k Y_j) T_i + (X_k Y_i - X_i Y_k) T_j + (X_i Y_j - X_j Y_i) T_k], \\ a_2 &= \frac{1}{2A} [(Y_j - Y_k) T_i + (Y_k - Y_i) T_j + (Y_i - Y_j) T_k], \\ a_3 &= \frac{1}{2A} [(X_k - X_j) T_i + (X_i - X_k) T_j + (X_j - X_i) T_k] \end{aligned} \quad (3)$$

где  $A$  обозначает площадь треугольного элемента, значение которой связано с определителем [3]:

$$\begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix} = 2A \quad (4)$$

## Выполнение расчета

Матрица теплопроводности.

Локальная матрица теплопроводности треугольного элемента составлена из следующих компонент:

- теплопроводность в направлении  $x$ ;
- теплопроводность в направлении  $y$ ;
- возможная потеря тепла в результате конвективного теплообмена на границе.

Глобальная матрица теплопроводности строится путем прямого суммирования всех локальных матриц элементов из данной области:

$$[K] = \sum_{n=1}^N [K]^{(e)}, \quad (5)$$

$$\text{где } [K]^{(e)} = \frac{k_x}{4A} \begin{bmatrix} \beta_i^2 & \beta_i \beta_j & \beta_i \beta_k \\ \beta_i \beta_j & \beta_j^2 & \beta_j \beta_k \\ \beta_i \beta_k & \beta_j \beta_k & \beta_k^2 \end{bmatrix} + \frac{k_y}{4A} \begin{bmatrix} \delta_i^2 & \delta_i \delta_j & \delta_i \delta_k \\ \delta_i \delta_j & \delta_j^2 & \delta_j \delta_k \\ \delta_i \delta_k & \delta_j \delta_k & \delta_k^2 \end{bmatrix} + K_{\text{дон}} - \text{ос-}$$

новные слагаемые,

$$K_{don} = \frac{hl_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \frac{hl_{jk}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \frac{hl_{ki}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} - \text{дополнительные}$$

слагаемые.

Матрица теплоемкости.

Вклад отдельного граничного элемента в эту матрицу определяется объемным интегралом, который должен быть вычислен для каждого элемента:

$$[C]^{(e)} = c\rho \int_A \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \end{bmatrix} dA = \frac{c\rho A}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Вектор тепловой нагрузки.

Имеем общую формулу нахождения глобального вектора тепловой нагрузки:

$$\{Q\} = \sum_{n=1}^N \{Q\}^{(e)}, \quad (7)$$

в котором  $\{Q\}^{(e)} = \frac{hT_f l_{ij}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \frac{hT_f l_{jk}}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}, \frac{hT_f l_{ki}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}.$

Построение расчетной схемы.

Для решения поставленной задачи имеем общую формулу:

$$[A]\{T_1\} = \{B\}, \quad (8)$$

где  $[A] = [C] + \frac{\Delta t}{2} [K],$

$$\{B\} = \left( [C] - \frac{\Delta t}{2} [K] \right) \{T_0\} + \Delta t \{Q\}.$$

Получаем СЛАУ, которая решается методом Гаусса. Матрица A квадратная и имеет большую размерность. При этом она является разреженной. Таким образом, хранение всей матрицы увеличит время вычислений и занимаемую машинную память, в отличие от способа, когда хранятся только ненулевые элементы[2].

### Разреженные матрицы

Способы представления разреженных матриц:

а) Разреженный строчный формат

Необходимо завести три одномерных массива:

AN – массив ненулевых элементов исходной матрицы,

JA – массив соответствующих столбцовых индексов ненулевых элементов исходной матрицы

IA – так называемый «массив указателей» - целочисленный массив, i-ая компонента которого указывает, с какой позиции массивов AN и JA начинается описание i-ой строки исходной матрицы.

б) Разреженный столбцовый формат

Все элементы хранятся не по строчкам, а по столбцам. Если транспонировать исходную матрицу и найти ее строчный формат, то результатом будет разреженный столбцовый формат.

в) Выделение диагональных элементов матрицы для симметричной матрицы.

Используются те же массивы AN, JA, IA, только добавляется еще один массив AD, в котором хранятся диагональные элементы матрицы. В массиве AN хранится только верхняя часть матрицы, так как она является симметричной.

г) Диагональная схема хранения ленточных матриц  
 Квадратная матрица называется  $(2m+1)$  – диагональной или ленточной, если  $a_{ij}=0$  для всех  $i, j$  таких, что  $|i - j| > m$ . Число  $(2m+1)$  – это ширина ленты,  $m$  – полуширина [4].

Была разработана программа, которая на конкретном примере показывает выигрыш во времени при использовании вышеописанных способов хранения.

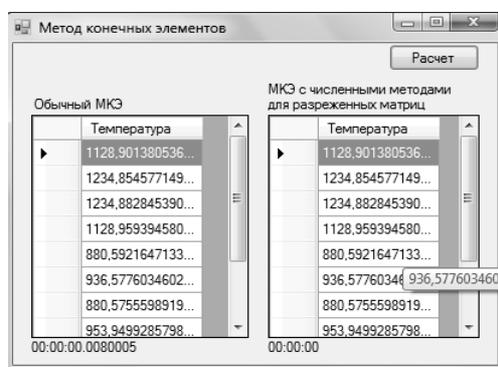


Рис. 1. Выигрыш во времени при использовании численных методов работы с разреженными матрицами

Используемый для решения задачи обычный метод конечных элементов является трудоемким и требует значительных вычислительных затрат, приводящих к резкому увеличению времени получения решения. Поэтому был предложен алгоритм сокращения вычислений по методу конечных элементов.

### Список литературы

1. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики, 5-е изд.: учебное пособие. М.: Наука, 1977. 742 с.
2. Румянцев А.В. Метод конечных элементов в задаче теплопроводности: Учебное пособие. Калинингр. ун-т. Калининград, 1995. 170 с.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 392 с.
4. Блатов И.А., Глушакова Т.Н. Численные методы для разреженных матриц, методическое указание. Воронеж: ВГУ, 1994. 32с.

## **СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА**

### **Аннотация**

В данной статье рассмотрены современные методы распознавания образов по изображениям, выбран метод и модель представления изображения для распознавания поверхностных дефектов проката листового металла, обоснован выбор ключевых признаков распознавания.

В настоящее время сложилась система методов, моделей и средств обнаружения дефектов производства листового проката, разработаны общеметодологические принципы их использования, позволяющие решать широкий спектр задач идентификации. Вместе с тем, существующие средства идентификации дефектов не позволяют распознавать типы дефектов и работают при скоростях проката, ограничивающих потенциальную производительность прокатных станов. В связи с возможностью устранения части поверхностных дефектов в процессе производства возникает необходимость разработки подходов к распознаванию дефектов продукции прокатного стана. Это определяет актуальность проведения исследований в области автоматизации распознавания устранимых поверхностных дефектов проката с оперативной коррекцией параметров контура управления.

Центральное место исследований занимает моделирование изображений. В качестве основы принимается модель изображения для идентификации поверхностных дефектов, описанная в [1]. Согласно предложенной модели алгоритм идентификации поверхностных дефектов, основанный на двумерном вейвлет-преобразовании (ВП), устанавливает наличие дефекта по изображению проката и выделяется область дефекта (ОД)  $R_{def}$  на первых трех уровнях расчета вейвлет-коэффициентов.

### **Выбор метода и модели для распознавания**

Основные методы распознавания образов (РО) представлены на рисунке 1.

Среди методов РО можно выделить две группы: структурные методы и методы на основе теории решений (ТР) [2,3].

Структурные методы нацелены на РО за счет использования структурных связей составных частей объектов. Среди данных методов можно выделить метод сопоставления строк символов, синтаксическое распознавание строк символов на основе грамматик [2], синтаксическое распознавание деревьев. В случае, когда рассматриваемые объекты являются изображениями, как правило, рассматриваются структурные связи элементов границ или сегментов изображения [3]. Однако, для некоторых классов поверхностных дефектов (мятость, плена), форма может быть разнообразной. В связи с этим, описание формы этих

дефектов в виде строк символов или деревьев является весьма сложной задачей, не решаемой в реальном времени.



Рис. 1. Основные методы распознавания образов

Методы на основе ТР основаны на использовании дискриминантных функций. Пусть  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – кортеж, содержащий значения  $n$  количественных признаков объекта. Тогда основную задачу РО в ТР можно сформулировать следующим образом. Если существует  $W$  классов объектов  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_W$ , то требуется найти  $W$  дискриминантных функций  $d_1(x), d_2(x), \dots, d_W(x)$ , таких, что если образ принадлежит классу  $\omega_i$ , то

$$d_i(x) > d_j(x), j=1,2,\dots,W; j \neq i \quad (1)$$

Среди методов, основанных на теории решений можно выделить методы, основанные на сопоставлении, на вероятностном подходе и нейронные сети [3].

В методах, основанных на сопоставлении, незнакомый образ приписывается тому классу объектов, прототип которого оказывается ближайшим в смысле заранее заданной метрики [3,4]. Одной из проблем данной группы методов применительно к задаче распознавания поверхностных дефектов листового проката является сложность построения прототипов дефектов.

Наиболее подходящей группой методов распознавания поверхностных дефектов по изображениям являются нейронные сети, так как они позволяют строить дискриминантную функцию непосредственно в процессе обучения. При этом нет необходимости делать предположения о функции распределения вероятностей или других вероятностных параметров рассматриваемых классов.

Так как РО при помощи нейронной сети относится к группе методов, основанных на теории решений, то модель распознаваемого объекта представляется в виде кортежа

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (2)$$

где:  $n$  – число признаков;

$x_i$  – значение  $i$ -го признака,  $i \in \overline{1, n}$ .

## Выбор признаков

Основной задачей при построении модели распознаваемого дефекта является выбор признаков. Так как при идентификации дефекта определяется так же его ОД  $R_{def}$ , то имеет смысл получать признаки дефекта на основе данной области, без учета текстурной составляющей изображения с дефектом. Это поможет сократить время на определения значений признаков и получить наиболее существенные характеристики дефекта.

Признаки можно выделять на основе пространственного и частотного представлений изображения.

В пространственном представлении изображение задается значениями яркости пикселей. При этом признаки можно разделить на геометрические и статистические.

Среди геометрических признаков можно выделить:

1. Периметр  $P$  – количество точек, лежащих на границе ОД.
2. Площадь  $S$  – количество точек, принадлежащих ОД.

3. Компактность  $q$ ,  $q = \frac{P^2}{S}$

4. Число Эйлера  $E$ ,  $E = C - H$ , где  $C$  – число связных компонент,  $H$  – число отверстий.

5. Число узлов остова ОД  $N_{ost}$  (под узлом остова будем понимать общую точку для более, чем двух ребер остова).

6. Длина остова ОД  $L_{ost}$  – число пикселей остова.

Среди статистических признаков можно выделить:

1. Среднее значение яркости в ОД  $m = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in R_{def}} I(x,y)$  (1)

2. Среднеквадратичное отклонение (СКО) яркости в ОД

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in R_{def}} (I(x,y) - m)^2}$$

Переход к частотному представлению изображений производится при помощи двумерного преобразования Фурье или двумерного дискретного ВП. Сравнивая эти два метода можно выделить следующие преимущества ВП: возможность использования различных базисных функций, возможность разложения с различным размером окна. Также вследствие того, что ВП является пространственно-частотным можно анализировать только те коэффициенты ВП, которые соответствуют ОД [4]. Следует отметить, что коэффициенты ВП вычисляются в ходе идентификации поверхностных дефектов и их использование в процессе определения признаков распознаваемого объекта позволяет сократить общий объем вычислений на распознавание.

Таким образом, можно выделить следующие признаки на основе частотного представления изображения:

1. Средние значения коэффициентов в горизонтальных, вертикальных, диагональных компонентах ВП, вычисленные внутри ОД

$$mw_z^i = \frac{1}{n_i} \sum_{(x,y) \in R_{def}} w_z^i(x,y),$$

где  $i$  – уровень ВП,  $i=1,2,3$ ;

$z$  – направление преобразования LH (вертикальное), HL (горизонтальное), HH (диагональное);

$w_z^i$  – коэффициенты ВП на уровне  $i$  по направлению  $z$ .

СКО горизонтальных, вертикальных, диагональных компонент ВП, вычисленные внутри ОД  $\sigma w_z^i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in R_{def}} (w_z^i(x,y) - mw_z^i)^2}$ ,

где  $i$  – уровень ВП,  $i=1,2,3$ ,

$z$  – направление преобразования LH, HL, HH

$w_z^i$  – коэффициенты ВП на уровне  $i$  по направлению  $z$ .

С учетом выделенных признаков модель изображения, содержащего дефект, можно представить в виде кортежа следующего вида:

$$x = \left\{ P_{def}, S_{def}, q_{def}, E, m, \sigma, mw_{HL}^1, mw_{LH}^1, mw_{HH}^1, mw_{HL}^2, mw_{LH}^2, mw_{HH}^2, mw_{HL}^3, mw_{LH}^3, mw_{HH}^3, \sigma w_{HL}^1, \sigma w_{LH}^1, \sigma w_{HH}^1, \sigma w_{HL}^2, \sigma w_{LH}^2, \sigma w_{HH}^2, \sigma w_{HL}^3, \sigma w_{LH}^3, \sigma w_{HH}^3, N_{ost}, L_{ost} \right\} \quad (3)$$

## Заключение

Таким образом, в настоящей работе систематизированы методы распознавания образов по изображениям; обоснован выбор метода распознавания поверхностных дефектов листового проката; предложена модель представления изображения для распознавания поверхностных дефектов листового проката; выделены признаки, на основании которых можно распознать поверхностные дефекты листового проката.

## Список литературы

1. Развитие АСУТП прокатного стана на основе выявления поверхностных дефектов металла методом вейвлет-преобразований видеоизображений / Д.П. Бугаев, Н.А. Соловьев // Специальный выпуск журнала «Известия Самарского научного центра Российской академии наук». 2009. С. 180-184.

2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

5. Преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Их свойства и применение / Л.Г. Васильева, Я.М. Жилейкин, Ю.И. Осипик // Вычислительные методы и программирование. 2002. Т. 3. С.172-175.

## **КОНЦЕПЦИЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ГТД НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПО ИЗМЕРЯЕМЫМ ПАРАМЕТРАМ МОДЕЛИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННОЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ**

### **Аннотация**

Предложена концепция системы мониторинга состояния авиационного ГТД на основе контроля, диагностики состояния и прогнозирования ресурса лопаток высоконагруженных турбин перспективных ГТД. Для оценки состояний лопаток в процессе эксплуатации ГТД предложена структура бортового интеллектуального пирометрического модуля, основанного на идентификации модели по измеряемым параметрам, включая температуру лопаток. Предложен подход к расчету структурных и прочностных характеристик их материала в зависимости от режимов, наработки и количества циклов в реальном времени.

### **Введение**

В современных подходах к обеспечению эксплуатации по состоянию и системной безопасности авиационного ГТД ключевая роль отводится системам управления, контроля и диагностики (FADEC). Одним из наиболее критичных компонентов современных и перспективных двигателей являются лопатки высоконагруженных турбин.

### **Основа концепции мониторинга термонапряженного состояния и ресурса лопаток высоконагруженных турбин ГТД**

Предлагается концепция бортового канала мониторинга термонапряженного состояния и оценки остаточного ресурса рабочих лопаток (РЛ) турбин с учетом изменения структуры и характеристик материала РЛ в процессе эксплуатации. Накопление данных производится за все время полета в памяти бортового интеллектуального пирометрического модуля (ИПМ) в составе распределенной системы автоматического управления, контроля и диагностики (САУКиД), или FADEC. В составе ИПМ математическая модель термонапряженного состояния РЛ в реальном масштабе времени рассчитывает поля температур  $T_i$ , и напряжений  $\sigma_i$ , по каждому элементу разбиения РЛ (номинальной геометрии). Бортовой вариант модели для стационарных и нестационарных режимов предложен в работе [1] и основан на решении известного уравнения теплопроводности:  $q = -\lambda \text{grad } t$  [2] методом элементарных балансов Ваничева с граничными и начальными условиями, определяемыми конструкцией лопатки и системы охлаждения. Алгоритм идентификации расчетных значений температур по каждой лопатке основан на сдвиге поля температур на величину разности расчетной и измеренной ИПМ температур. По фактическим значениям тем-

ператур  $T_{i\phi}$  и напряжений  $\sigma_{i\phi}$ , определяемых с учётом механического движения лопаток в газодинамическом потоке, рассчитываются значения приведенного ресурса для каждой лопатки. Значения предельных характеристик материала хранятся в статистической модели состояния материала. Оценка остаточного ресурса РЛ производится САУКиД по совокупности данных прямых измерений ИПМ, данных встроенной модели полей температур и напряжений в теле каждой РЛ в реальном времени и данных экспертной системы (ЭС) состояния материала РЛ.

Базовая экспертная система накапливает и оценивает результаты технологических инструментальных исследований материала РЛ для всего парка однотипных ГТД, проводимых в течение этапов изготовления, эксплуатации и ремонта. Данные ЭС используются в бортовом канале мониторинга.

### **Структура бортового интеллектуального пирометрического модуля**

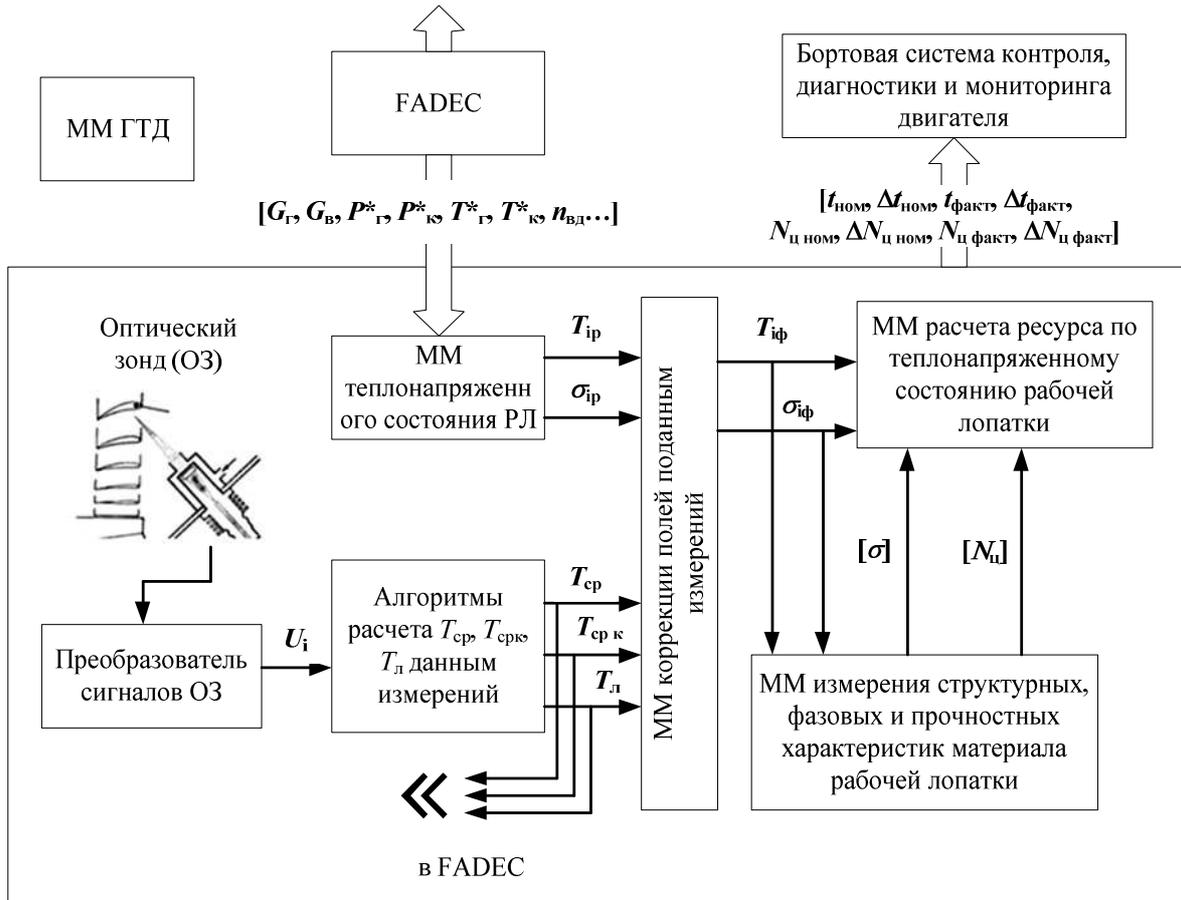
Бортовой интеллектуальный пирометрический модуль унифицированной конструкции включает 2 канала измерения температуры поверхности каждой из рабочих лопаток по линии сканирования оптического луча пирометра и встроенную математическую модель расчета полей температур и напряжений в теле РЛ [1].

Схема интеллектуального пирометрического модуля представлена на рис. 1. В состав бортового ИПМ входят оптический зонд (ОЗ), модули преобразователя оптических сигналов ОЗ, вычислитель с соответствующим прикладным обеспечением. Бортовой ИПМ выполняет в реальном времени следующие функции: измерение и обработку информации о текущих значениях измеренной оптическим пирометром температуры лопаток турбины; расчет температур и напряжений в расчетных точках турбинной лопатки по средней геометрии; идентификацию полей температур и напряжений по данным измерений оптического пирометра; расчет расхода и остатка ресурса по каждой из рабочих лопаток для всей номенклатуры режимов работы двигателя с учетом данных модели изменения структурных, фазовых и прочностных характеристик в материале лопатке.

### **Бортовая статическая модель состояния материалов рабочих лопаток**

Поскольку структурные и фазовые изменения в материале лопаток играют важную роль во влиянии на надежность и долговечность лопаток, оценивать влияние различных аспектов эксплуатации двигателей на надежность и долговечность РЛ необходимо с учетом эффектов взаимодействия ползучести, усталости, фазовых и структурных изменений материала лопаток, которые определяют следующие показатели: состав и количество  $\gamma$ -фазы/  $\gamma'$ -фазы; тип, состав и количество карбидов/ боридов; тип, состав и количество  $\mu$ -фазы/  $\eta$ -фазы/  $\sigma$ -фазы.

Система управления, контроля и диагностики силовой установки



$\sigma$ -напряжение;  $N_{ц}$ - число циклов;  $[N_{ц}]$  - допустимое число циклов;  $[\sigma]$ -длительная прочность;  $t$ -ресурс;  $\Delta t$  - остаточный ресурс;  $T_{ср}$  - средняя температура поверхности всех лопаток по линии сканирования;  $T_{срк}$  - средняя температура входных (выходных) кромок лопаток по линии сканирования;  $T_{л}$  - локальная температура входных (выходных) кромок по линии сканирования;  $T_{ip}$  - расчетная температура в точках рабочей лопатки;  $\sigma_i$  - напряжение в расчетной точке лопатки; индекс  $p$  - относится к расчетному значению; индекс  $f$  - соответствует фактическому значению

Рис. 1. Система интеллектуального мониторинга рабочих лопаток турбин

С увеличением  $\sigma$ ,  $T$ ,  $\tau$  происходят структурные изменения: уменьшение  $\gamma$ -фазы,  $\gamma'$ -фазы, коагуляция  $\gamma'$ -фазы, увеличение  $\mu$ -фазы,  $\eta$ -фазы,  $\sigma$ -фазы, что приводит к уменьшению длительной пластичности (сплав «охрупчивается»), жаропрочности, долговечности. В данной модели входными параметрами являются температура и суммарные напряжения в лопатке, а также параметры термоциклов, определяемые по данным ИПМ. Выходными параметрами являются максимально допустимые (предельные) значения критериев, определяющих свойства материала РЛ, в частности, предел длительной прочности материала  $\sigma_{\tau}$ . Качественный характер изменения  $\sigma_{\tau}$  от критерия Ларсона–Миллера, используемого в алгоритме расчета эквивалентного ресурса РЛ [1] показан на рис. 2.

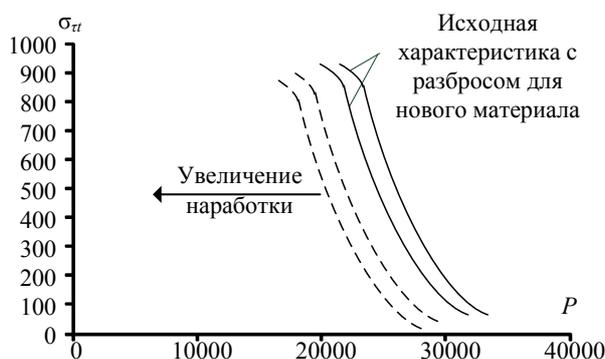


Рис. 2. Качественный характер зависимости длительной прочности материала РЛ от эксплуатационной наработки РЛ

В данном алгоритме по фактическому распределению температур рассчитываются термические напряжения  $\sigma_i$  в элементах РЛ и по заданному запасу прочности:

$$K_{\sigma} = \sigma_{\tau,t} / \sigma = (1,5 \dots 2,5)$$

определяется предел длительной прочности  $\sigma_{\tau,t} = \sigma_i \cdot K_{\sigma}$ , по которому находится параметр  $P$  Ларсона–Миллера для данного материала:

$$P = (t + 273) \cdot (\lg \tau + 20) = f(\sigma_{\tau,t}),$$

где:  $t$  – температура ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\tau$  – ресурс (час). Отношение  $\tau$  к эквивалентному ресурсу  $\tau_{\min}$  для взлетного режима определяется соотношением  $\varepsilon = \tau / \tau_{\min}$ .

В алгоритме расчета ресурса по малоцикловой усталости используются критериальные зависимости допустимого числа циклов  $N$  от максимальной температуры цикла элемента и величины размаха термических напряжений в элементе РЛ.

### Заключение

Предложенная концепция бортовой системы мониторинга состояния авиационного ГТД позволяет проводить идентификацию модели высоконагруженной лопатки турбины по измеряемым параметрам и статистическим данным изменения структуры, а также проводить оценку предельных индивидуальных характеристик материала рабочих лопаток.

### Список литературы

1. Информационная технология интеграции интеллектуального пирометрического модуля в систему управления, контроля и диагностики (FADEC) ГТД/ Распопов Е.В., Куликов Г.Г., Трушин В.А., Фатиков В.С., Андреева Т.П., Губайдуллин И.Т. // Вестник УГАТУ, Уфа, Россия, 2010. Т.14, № 3(38). С. 101–110.

2. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1949. – 396 с.

3. Термонапряженное состояние термобарьерного покрытия перфорированной лопатки турбины на переходных режимах работы ГТД/ В.А. Трушин, О.В. Трушин. // Техника воздушного флота. Том LXXIX, 2006, №6(677). С. 51–57.

## **ВЫЧИСЛЕНИЕ КООРДИНАТ СМЕЩЕНИЯ ТОРЦОВ ЛОПАТОК В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ**

### **Аннотация**

В статье дано развернутое описание алгоритма вычисления с использованием геометрических представлений, поясняющих применяемые процедуры на всех этапах его функционирования.

Радиальные зазоры (РЗ) между торцами лопаток и статором в компрессоре и турбине авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) являются наиболее значимыми параметрами, определяющими его экономичность и надежность. Поэтому в системах управления авиационных ГТД пятого поколения предполагается использование датчиков, обеспечивающих измерение РЗ в тяжелых и даже экстремальных условиях газовоздушного тракта [1].

Известны конструктивные разновидности одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника, которые подтвердили свою работоспособность в составе компьютеризированных систем измерения РЗ в процессе стендовых испытаний ГТД [2]. При этом предполагалось, что изменение РЗ вызваны упругими и термическими деформациями элементов конструкций лопаточного колеса. Однако в реальных условиях торцы лопаток совершают многомерные движения, на которые, в частности, оказывают влияние осевые смещения лопаточного колеса и изгиб лопаток, причем наибольший вклад, как правило, связан с осевыми смещениями. Если ЧЭ размещен на внутренней поверхности статора, а система отсчета  $OXY$  жестко связана с ним и ее начало (точка  $O$ ) находится в центре ЧЭ, то радиальным смещениям торца лопаток соответствует координата  $y$  (РЗ), а осевым – координата  $x$ . Но выходной параметр ЧЭ (индуктивность) реагирует на изменение обеих координат ( $y, x$ ). Тогда при поставленной задаче измерения РЗ (координаты  $y$ ), изменение осевого смещения (координаты  $x$ ) является мешающим фактором (МФ).

Наиболее радикальным способом уменьшения влияния МФ является измерение не только искомой координаты  $y$ , но и координаты  $x$ .

Такую возможность представляют так называемые кластерные методы [1], которые предусматривают применение группы (кластера) ОВТД с определенной топологией размещения ЧЭ относительно торца лопатки. Число ОВТД равно числу искомым координат. Для измерения двух координат  $y, x$  использован кластер из двух ОВТД (ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub>). Начало системы отсчета размещено в геометрическом центре кластера. Информативными параметрами являются экстремальные значения индуктивностей ОВТД при прохождении

торцом лопатки зоны чувствительности ЧЭ датчика. В системе измерения изменения индуктивностей ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub> преобразуются в коды  $C_1$  и  $C_2$  [2].

Вычисление координат  $y$  и  $x$  осуществляется на основе семейства градуировочных характеристик (ГХ), полученных экспериментально, и текущих значений кодов  $C_1$  и  $C_2$  с помощью численного метода секущих Ньютона [1-3] при аппроксимации семейства ГХ полиномиальными функциями нескольких переменных или с использованием кусочно-линейной интерполяции.

В [2] приведена геометрическая интерпретация определения искомым координат смещений, предусматривающего решение системы из двух уравнений:  $C_1=C_1(x, y)$ ,  $C_2=C_2(x, y)$ , где  $C_1(x, y)$ ,  $C_2(x, y)$  – ГХ канала ОВТД<sub>1</sub> и ОВТД<sub>2</sub> соответственно.

Семейство ГХ представляет собой поверхности  $C_1(x, y)$  и  $C_2(x, y)$ , а кодам  $C_1$  и  $C_2$  соответствуют плоскости, параллельные плоскости  $OXY$ . Поверхности  $C_1(x, y)$  и  $C_2(x, y)$  пересекаются с плоскостями  $C_1$  и  $C_2$ , а проекции линий пересечения на плоскость  $OXY$  обозначены  $Q_1$  и  $Q_2$ . Искомые  $y$  и  $x$  координаты соответствуют точке пересечения проекций  $Q_1$  и  $Q_2$  на плоскости  $OXY$  [2].

Поиск решения системы представляет собой итерационный процесс, который характеризуется повторяющимся построением секущих на проекциях  $Q_1$  и  $Q_2$ . Координаты точки пересечения секущих на последней итерации являются искомыми значениями  $y$  и  $x$ . Известным ограничением метода является обязательное условие монотонности ГХ [3] (отсутствие локальных экстремумов на проекциях  $Q_1$  и  $Q_2$ ).

Вместе с тем, реальные ГХ канала ОВТД в составе кластера могут иметь участок с экстремумом по координате  $x$ . В этой связи приходится смещать рабочий диапазон в область, где ГХ монотонна, что ведет к существенному сужению рабочего диапазона.

В работе [4] предложен алгоритм вычисления  $y, x$  – координат, свободный от указанных ограничений. Однако суть алгоритма изложена в сжатом виде, в его описании отсутствуют важные детали, что затрудняет понимание. При этом основное внимание уделяется результатам применения алгоритма и оценка его точности.

В настоящей статье дано развернутое описание предложенного алгоритма с использованием геометрических представлений, поясняющих применяемые процедуры на всех этапах его функционирования. Приведена также подробная блок-схема алгоритма.

Как отмечалось в [4], в предлагаемом алгоритме семейство ГХ представлено в виде таблиц, а на рисунке 1 – поверхностями  $C_1(x, y)$  и  $C_2(x, y)$  с нанесенными на них сетками, которым соответствует сетка на плоскости  $OXY$ . Значения кодов таблиц соответствуют узлам сеток.

На рис. 2,а изображена плоскость  $OXY$  с фрагментом координатной сетки и значениями табличных кодов ГХ  $C_1$  и  $C_2$ , причем координатные линии ограничивают лишь те ячейки прямоугольной формы из возможного множества (рисунк 1), которые находятся в окрестности ячейки, где пересекаются проекции  $Q_1$  и  $Q_2$ .

Особенность предлагаемого алгоритма состоит в том, что в нем отпадает необходимость поиска линий пересечения поверхностей  $C_1(x,y)$  и  $C_2(x,y)$  с плоскостями  $C_1$  и  $C_2$ , а также проекций  $Q_1$  и  $Q_2$  в аналитическом виде. Вместо этого на первом этапе алгоритм выполняет поиск «зон пересечений», образованных ячейками, в которых проходят и  $Q_1$  и  $Q_2$ . Проверяется каждая пара координат и кодов ячеек в направлении оси  $X$ , а затем оси  $Y$  для обеих градуировочных таблиц. На рисунке 1 штриховкой показаны «зоны пересечений» поверхности  $C_1(x,y)$  с плоскостью  $C_1$ , а затемнением – поверхности  $C_2(x,y)$  с плоскостью  $C_2$ . На том же рисунке и на рисунке 2,а в плоскости  $OXY$  штриховкой показаны ячейки, через которые проходят проекции  $Q_2$ , а затемнением – ячейки с проекцией  $Q_1$  (проекции  $Q_1$  и  $Q_2$  изображены пунктиром).

Кроме того, крестиками ( $\otimes$ ) на границах ячеек (рис. 2,а) обозначены коды экстремальных значений  $C_1$  и  $C_2$ , которые совпадают с точками проекций  $Q_1$  и  $Q_2$ .

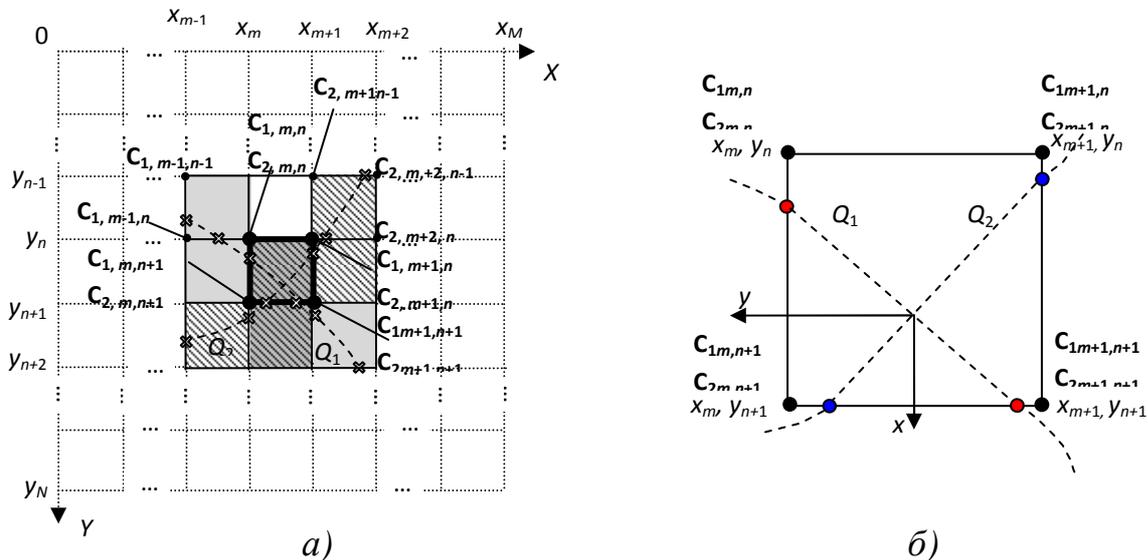


Рис. 2. Фрагмент сетки градуировочной таблицы на плоскости  $OXY$  (а) и ячейка с пересечением  $Q_1$  и  $Q_2$  (б)

Там же приведены табличные коды в узлах ячеек, для которых справедливы неравенства:

для ячейки с узлами  $(m-1, n-1)$ ,  $(m, n-1)$ ,  $(m-1, n)$ ,  $(m, n)$

$$C_{1,m-1,n-1} < C_1 < C_{1,m,n-1}; \quad C_{1,m-1,n} < C_1 < C_{1,m,n}$$

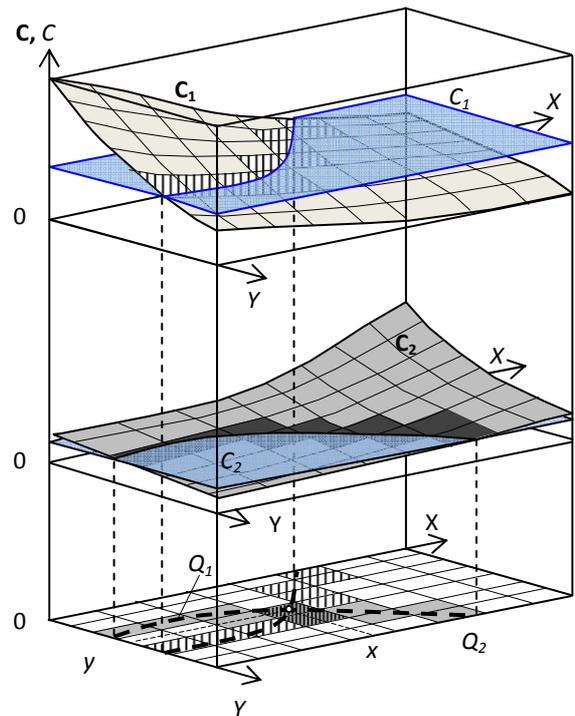


Рис. 1. Геометрическая интерпретация предлагаемого алгоритма

для ячейки с узлами  $(m+1, n-1)$ ,  $(m+2, n-1)$ ,  $(m+1, n)$ ,  $(m+2, n)$

$$C_{2, m+1, n-1} < C_2 < C_{2, m+2, n-1}; \quad C_{2, m+1, n} < C_2 < C_{2, m+2, n}$$

Для остальных ячеек «зон пересечения» можно записать подобные неравенства. Те ячейки, где проходят обе проекции, выделены штриховкой на затемненном фоне. Выбранные ячейки запоминаются для последующей обработки.

На рис. 2, б приведено укрупненное изображение ячейки с пересечением  $Q_1$  и  $Q_2$ , где обозначены точки входа ( $A1, A2$ ) и выхода ( $B1, B2$ ) проекций.

На втором этапе работы алгоритма анализируются выбранные ранее ячейки. Используя линейную интерполяцию, вычисляются координаты точек  $A1, A2, B1, B2$  по координатам и величинам кодов в прилегающих узлах. Ниже приведен пример этих вычислений для ячейки на рис. 2, б:

$$x_{11} = \frac{(C_1 - C_{m,n}) \cdot (x_m - x_m)}{(C_{m,n+1} - C_{m,n})} + x_m, \quad y_{11} = \frac{(C_1 - C_{m,n}) \cdot (y_{n+1} - y_n)}{(C_{m,n+1} - C_{m,n})} + y_n,$$

$$x_{12} = \frac{(C_1 - C_{m,n+1}) \cdot (x_{m+1} - x_m)}{(C_{m+1,n+1} - C_{m,n+1})} + x_m, \quad y_{12} = \frac{(C_1 - C_{m,n+1}) \cdot (y_{n+1} - y_{n+1})}{(C_{m+1,n+1} - C_{m,n+1})} + y_{n+1},$$

$$x_{21} = \frac{(C_2 - C_{m+1,n}) \cdot (x_{m+1} - x_{m+1})}{(C_{m+1,n+1} - C_{m+1,n})} + x_{m+1}, \quad y_{21} = \frac{(C_2 - C_{m+1,n}) \cdot (y_{n+1} - y_n)}{(C_{m+1,n+1} - C_{m+1,n})} + y_n,$$

$$x_{22} = \frac{(C_2 - C_{m,n+1}) \cdot (x_{m+1} - x_m)}{(C_{m+1,n+1} - C_{m,n+1})} + x_m, \quad y_{22} = \frac{(C_2 - C_{m,n+1}) \cdot (y_{n+1} - y_{n+1})}{(C_{m+1,n+1} - C_{m,n+1})} + y_{n+1},$$

где индексы координат точек входа и выхода проекций в ячейку: первый – номер проекции (1 или 2), второй – 1 – для точки входа, 2 – для точки выхода;  $x_m, x_{m+1}, y_n, y_{n+1}$  – координаты узлов ячейки;  $C_{m,n}, C_{m+1,n}, C_{m,n+1}, C_{m+1,n+1}$  – коды, соответствующие этим координатам.

При этом точки входа  $A1(x_{11}, y_{11}), A2(x_{21}, y_{21})$  и выхода  $B1(x_{12}, y_{12}), B2(x_{22}, y_{22})$ , могут располагаться на любой из четырех сторон ячейки. Через полученные точки проводятся два отрезка прямых  $A1B1$  и  $A2B2$ , координаты точки пересечения которых являются искомыми значениями  $y$  и  $x$ , а также решением системы из двух линейных уравнений, что не вызывает каких-либо трудностей, и в этой связи здесь не приводится.

На рисунке 3 представлена блок-схема рассмотренного алгоритма вычисления  $y, x$  – координат. В блоке 3 происходит формирование массива ячеек, попадающих в «зону пересечения». Далее, в блоках 5-9, в цикле, производится анализ выбранных ячеек и определение ячейки, в которой пересекаются  $Q_1$  и  $Q_2$ . В блоке 10 производится решение системы линейных уравнений, результатом которого являются искомые координаты  $y$  и  $x$  для экстремальных кодов  $C_1$  и  $C_2$ . Если после анализа всех ячеек (проверка номера текущей ячейки на попадание в общее множество ячеек ( $M$  – количество ячеек по оси  $X, N$  – количество ячеек по оси  $Y$ )) производится в блоке 5) пересечение  $Q_1$  и  $Q_2$  не обнаружено, то программа завершается сообщением об отсутствии решения (блок 12).

В заключение следует отметить, что изложенный алгоритм вычисления, предусматривает табличное представление семейства ГХ, где каждая из таблиц содержит множество ячеек, определяемых шагом изменений координат  $y$  и  $x$  в процессе получения ГХ, причем каждой из ячеек соответствуют указанные в таблице значения цифровых кодов. В процессе последовательного перебора ячеек производится сравнение измеренных значений кодов с табличными. Процесс останавливается на ячейке с наилучшим приближением сравниваемых кодов в обеих таблицах. Искомое решение находится в пределах этой ячейки. От существующих алгоритмов, применяемых в системах измерения координат смещений, построенных на основе кластерных методов, разработанный алгоритм вычисления отличается возможностью использования немонотонных ГХ при наличии экстремумов в диапазоне изменений осевого смещения (координаты  $x$ ).

### Список литературы

1. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. О.П. Скобелева – М.: Машиностроение, 2011.-298с.

2. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара: Самарский НЦ РАН, 2001. – 188 с.

3. Бахвалов Н.С. Численные методы. - М.: Наука. 1975.

4. Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток //Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XII Международной конференции. Самара: Самарский НЦ РАН, 2010, с.323-327.

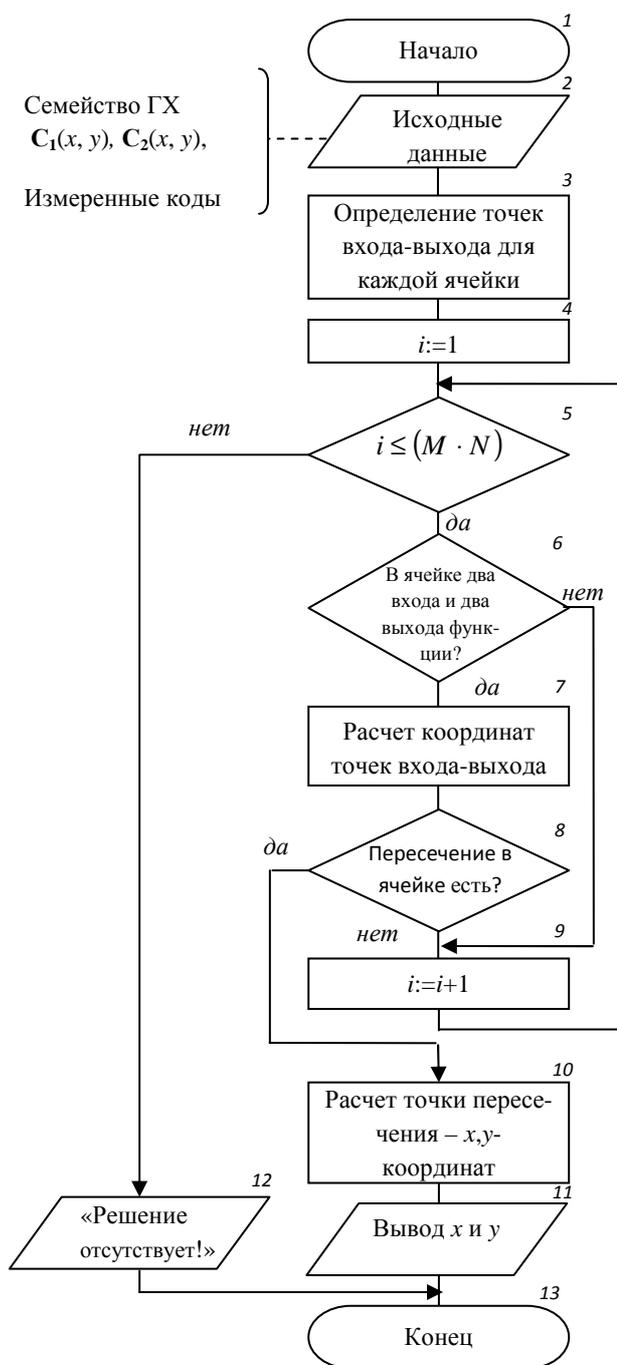


Рис. 3. Блок-схема алгоритма вычисления  $y, x$ -координат

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ БЕЗ ЖЕСТКОЙ СВЯЗИ С ОБЩЕЙ НАГРУЗКОЙ**

### **Аннотация**

В докладе показывается, что для систем стабилизации, содержащих однотипные двигатели, параллельно работающие на общую нагрузку и без жесткой связи с ней, наибольший КПД достигается при одинаковой уставке на двигатели с коррекцией на неидентичность их параметров дополнительным экстремальным регулятором.

### **Введение**

Системы стабилизации частоты вращения двигателей без жесткой связи с общей нагрузкой находят широкое применение на практике. К таким системам можно отнести параллельную работу синхронных генераторов на общую промышленную сеть с приводами от турбин одного типа или от электрических двигателей в системах бесперебойного питания, параллельную работу на общую трубу газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях (КС) с приводами от однотипных электрических двигателей или от газотурбинных двигателей. В силу высоких мощностей подобных систем вопросы оптимального управления, при котором обеспечивается максимальный КПД системы, остаются актуальными по настоящее время. В данной постановке можно выделить две задачи. Первая - это сравнение двух вариантов управления для двигателей с идентичными параметрами: 1) все двигатели кроме одного работают на максимуме своего КПД, а один работает не в оптимальном режиме и 2) все двигатели управляются одинаковыми уставками. Вторая задача – оптимальное управление в случае отличий отдельных параметров между однотипными двигателями.

### **Двигатели с идентичными параметрами (линейный вариант)**

В электрических системах каждый двигатель управляется своей индивидуальной системой стабилизации частоты вращения, а на компрессорных станциях используется система, вырабатывающая единый одинаковый сигнал на все газоперекачивающие агрегаты. В окрестности рабочего режима настройка отдельных стабилизаторов в электрических системах такова, что они практически могут быть представлены апериодическими звеньями первого порядка [1], так же как и каждый отдельно взятый ГПА в стационарном режиме [2]. Однако динамика подобных систем описывается сложнее [2] по сравнению с многодвигательными системами, в которых двигатели жестко связаны с нагрузкой [3]. Вместе с тем, в стационарном режиме при нахождении оптимальных настроек, влияние перекрестных связей в виде дополнительных разгрузочных моментов от соседних двигателей несложно учесть в уравнении статики каждого конкретного двигателя. В этом случае удобно проводить аналогию с нагруженным

двигателем постоянного тока при якорном управлении, уравнения статики которого имеют вид:

$$\begin{cases} U = rI + c\omega \\ M_d = cI \\ M_d = M_\sigma + M_n \end{cases}, \quad (1)$$

где  $U$  - управляющее напряжение,  $I$  - ток якоря,  $r$  - сопротивление обмотки якоря,  $c$  - коэффициент противоЭДС  $M_d$  - механический момент, развиваемый двигателем,  $M_\sigma$  - момент внутренних потерь в двигателе,  $M_n$  - суммарный внешний момент на валу двигателя, включающий внешнюю нагрузку и действие разгрузочных моментов соседних двигателей.

Коэффициент полезного действия  $\gamma$  определяется соотношением

$$\gamma = \frac{P_n}{P_s} = 1 - \frac{M_n r}{cU} - \frac{M_\sigma}{M_\sigma + M_n}, \quad (2)$$

где  $P_n$  - мощность, отдаваемая в нагрузку,  $P_s$  - мощность из электрической сети.

Анализ (2) показывает, что экстремум  $\gamma$  достигается при  $M_{opt} = \pm \sqrt{M_\sigma c^2 \omega / r}$ .

Анализ изменения  $\gamma$  в зависимости от общей нагрузки  $M_n$  для  $N+1$  параллельно работающих двигателей,  $N$  из которых работают с максимальным  $\gamma$ , нагруженные оптимальными моментами  $M_i = M_{opti} = \alpha M_n, i = 1, 2, \dots, N$ , а  $N+1$  нагружен моментом  $M_{N+1} = M_n(1 - \alpha N)$ , показывает, что при всех значениях  $M_n$  (кроме  $M_n = (N+1)M_{opt}$ )  $\gamma$  всей системы будет меньше, чем в случае одинаковой нагрузки двигателей моментами  $M_i = \frac{M_n}{N+1}$ . Этот результат иллюстрируется на рис.1 примером изменения  $\gamma$  системы из 10 параллельно работающих двигателей типа СЛ-569 в зависимости от общей нагрузки.

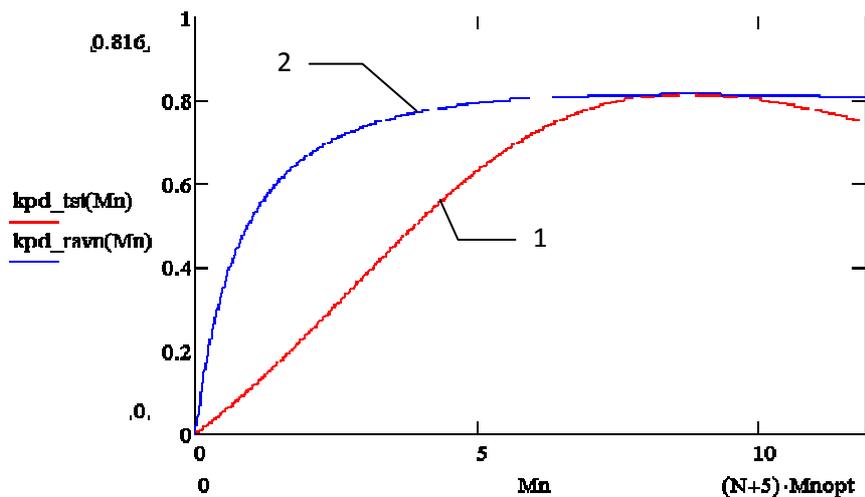


Рис.1. Зависимости  $\gamma$  от момента нагрузки для исследуемой системы (кривая 1) и системы с равномерным распределением нагрузки (кривая 2)

Рассмотренный числовой пример для относительно маломощных двигателей приводит к аналогичным результатам и для других типов двигателей с

линейными или линеаризованными в окрестности стационарного рабочего режима статическими характеристиками.

### Однотипные двигатели с разбросом параметров

В [2] показывается, что разброс параметров параллельно работающих двигателей, когда их динамика может быть описана линейными дифференциальными уравнениями первого порядка с постоянными коэффициентами, не оказывает существенного влияния на устойчивость системы. Однако максимум  $\gamma$  такой системы оказывается зависимым от параметров каждого двигателя (1).

Для уменьшения числа переменных введем обобщенный параметр  $k_i = \frac{r_i}{c_i^2}$  для каждого  $i$ -го двигателя. Тогда суммарная мощность, потребляемая от сети  $N$  параллельно работающими двигателями, будет:

$$P_s = \sum_{i=1}^N [k_i (M_{\sigma i} + \alpha_i M_n)^2 (M_{\sigma i} + \alpha_i M_n) \omega] \quad (3)$$

Очевидно, что для нахождения максимума  $\gamma$  необходимо искать условия, доставляющие минимум (3) путем приравнивания нулю частных производных по каждому из коэффициентов перераспределения нагрузки  $\alpha_i$ , так как мощность на общей нагрузке в стационарном режиме ( $\omega \approx const$ ) так же практически постоянна:

$$\frac{\partial P_s}{\partial \alpha_i} = 2k_i M_n M_{\sigma i} + 2k_i M_n^2 \alpha_i = 0 \quad (4)$$

Получающаяся система из  $N$  уравнений вида (4) позволяет определить  $N$  коэффициентов перераспределения нагрузки  $\alpha_i$  для каждого конкретного двигателя. Для нахождения этих решений на практике нет необходимости знать индивидуальные параметры каждого двигателя или хотя бы производить их косвенную оценку [4]. В силу единственности решения системы уравнений вида (4), можно использовать дополнительный общий экстремальный регулятор, который будет проводить периодическую по координатную оптимизацию режимов работы двигателей, вырабатывая дополнительные поправки к единым сигналам уставок на двигатели. Такой дополнительный экстремальный регулятор, как показывают исследования, оказывается достаточно эффективным и не влияет на динамику систем стабилизации при условии относительно медленных изменений внешних условий, приводящих к изменению общей нагрузки. Такой регулятор «не успевает» реагировать на быстрые изменения нагрузки и поэтому в нестационарных режимах «не мешает» работать основным регулятором.

### Двигатели с нелинейными статическими характеристиками

Параллельно работающие на общую нагрузку двигатели большой мощности, используемые в системах, могут иметь как линейные, так и нелинейные статические характеристики. Практически можно считать линейными характеристики синхронных двигателей с частотными приводами, используемых в ГПА. Однако их работа совместно с центробежными нагнетателями приводит к нелинейному виду статических характеристик, учитывающих газодинамиче-

ские свойства компрессоров [5]. То же самое происходит при использовании асинхронных двигателей с частотным приводом. Однако, при всех перемещениях рабочей точки по статической характеристике двигателя, обычно несколько меняется постоянная времени двигателя, что не сказывается на устойчивость всей системы [2]. Вместе с тем, как было показано выше, КПД системы оказывается близким к своему максимальному значению для любого участка нелинейной статической характеристики, если происходит равномерное распределение общей нагрузки между однотипными двигателями. В случае разброса параметров однотипных двигателей повышению КПД системы в стационарном режиме, так же как и для двигателей с линейными характеристиками, способствует корректировка единой уставки с помощью дополнительного экстремального регулятора.

### **Выводы**

Максимальный КПД системы параллельно работающих однотипных двигателей, не связанных жестко с общей нагрузкой, достигается равномерным распределением нагрузки между ними в случае идентичности их параметров.

Учет разброса параметров однотипных двигателей для достижения максимального КПД системы может быть осуществлен путем коррекции уставок для каждого двигателя дополнительным экстремальным регулятором.

Нелинейный вид статических характеристик эксплуатируемых на практике приводных двигателей, параллельно работающих на общую нагрузку в стационарном режиме, не вносит изменений в полученные результаты для двигателей, представляемых линейными статическими характеристиками.

### **Список литературы**

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.:Высшая школа. 1985.
2. Колосов О.С. Специфика параллельной работы динамических объектов и систем на общую нагрузку / О.С. Колосов, С.Н. Лепешкин, А.П. Сухецкий // Мехатроника, автоматизация, управление.– 2010. - №10. – С. 27 – 33.
3. Следящие приводы: В 3 т. Т.1: Теория и проектирование следящих приводов / Ред. Б. К. Чемоданов . – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 904 с.
4. Слободчиков К.Ю. Математическое и информационное обеспечение системы управления компрессорного цеха газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация в промышленности. ИПУ РАН. 2004. №7– С 38-42.
5. Колосов О.С. Имитационная динамическая модель компрессорного цеха реального времени в составе тренажерного комплекса / О.С. Колосов, С.Н. Лепешкин, В.Н. Смирнов, Ю.Р. Фалеев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. - №6. – С. 19 – 22.

## ОБОСНОВАНИЕ ПОРОГА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

### Аннотация

Решается задача обоснования порога идентификации поверхностных дефектов листового проката на основе сегментации. Предлагается комбинирование пороговых методов, основанных на использовании вейвлет-коэффициентов изображения поверхности проката.

### Введение

В условиях мировой финансовой нестабильности особую важность приобретает конкурентоспособность производимой продукции. Продукция прокатного производства цветного металла ОАО «ГЗОЦМ «СПЛАВ»» (г. Гай, Оренбургской области) получила широкое применение на предприятиях авиационной, автомобильной и пищевой промышленности, при этом повышенный интерес вызывает холоднокатаный тонколистовой прокат. Задача обеспечения требуемого качества продукции становится актуальной в связи со скачкообразным ростом дефектов при переходе на тонколистовой прокат.

Для основу решения задачи обнаружения поверхностных дефектов принята автоматическая системы идентификации на основе вейвлет-анализа видеоизображений, обеспечивающая коррекцию технологического процесса проката с целью устранения дефектов в процессе производства [1].

### Пороговая обработка изображений

Для идентификации дефектов и фильтрации шума необходимо провести сегментацию и определить порог высокочастотных вейвлет-коэффициентов (ВЧ ВК) [2]. Операция порогового разделения заключается в сопоставлении значения ВЧ ВК каждого пикселя изображения с заданным значением порога.

Пороговая обработка изображения может проводиться глобально или локально. Метод глобальной пороговой обработки позволяет определить пороговые значения ВЧ ВК. по методу Отса.

С помощью данного метода вычисляется порог  $D_p$ , минимизирующий среднюю ошибку от принятия решения о принадлежности пикселей к дефекту или фону. Значения ВК пикселей изображения рассматриваются как случайные величины. Если  $p_i$  – вероятность распределения ВК на изображении, то определяется оптимальный порог для сегментации изображения на два класса  $s_0$  и  $s_1$  (дефект и фон) [3].

$$p_i = \frac{h_i}{H}, i = 0, 1, \dots, L-1,$$

$$\sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1,$$
(1)

где:  $L$  – уровни яркости;

$h_i$  – число элементов изображения, имеющих яркость  $i$ ,  $i = 0, 1, \dots, L-1$ ;

$H$  – общее число пикселей на изображении.

Элементы изображения делятся на два класса  $c_0$  и  $c_1$  с помощью порогового значения  $D_p$ , где класс  $c_0$  содержит пиксели с ВК из множества  $(0, 1, \dots, D_p)$ , а класс  $c_1$  – пиксели с ВК из множества  $(D_p, D_p + 1, \dots, L - 1)$ . Вероятности каждого из этих двух классов и средние значения их ВК описываются выражениями:

$$P_0 = \sum_{i=0}^{D_p} p_i = P_{D_p},$$

$$P_1 = \sum_{i=D_p+1}^{L-1} p_i = 1 - P_{D_p},$$

$$M_0 = \sum_{i=0}^{D_p} ip_i / P_0 = M_{D_p} / P_{D_p},$$

$$M_1 = \sum_{i=D_p+1}^{L-1} ip_i / P_1 = (M_T - M_{D_p}) / (1 - P_{D_p}).$$
(2)

где  $M_T = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i$  средняя сумма ВК всего изображения.

Для любого  $D_p$  справедливо следующее соотношение:

$$P_0 M_0 + P_1 M_1 = M_T.,$$
(3)

Взвешенная дисперсия каждого из классов определяются формулами:

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=0}^{D_p} (i - M_0)^2 p_i / P_0, \quad \sigma_1^2 = \sum_{i=D_p+1}^{L-1} (i - M_1)^2 p_i / P_1.,$$
(4)

Определение оптимального порога осуществляется на основе оптимизации одной из следующих функций, зависящих от порога  $D_p$ :

$$\lambda = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_W^2}, \quad k = \frac{\sigma_T^2}{\sigma_W^2}, \quad \eta = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2}.$$
(5)

где  $\sigma_B^2 = P_0(M_0 - M_T)^2 + P_1(M_0 - M_T)^2 = P_0 P_1 (M_0 - M_1)^2$  – дисперсия межклассовая;

$\sigma_W^2 = P_0 \sigma_0^2 + P_1 \sigma_1^2$  – дисперсия внутриклассовая;

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (h_i - M_T)^2 p_i / P - \text{дисперсия совокупная, причем } \sigma_T^2 \text{ не зависит}$$

от величины порога  $D_p$  и выражается равенством

$$\sigma_T^2 = \sigma_W^2 + \sigma_B^2, \quad (6)$$

Величина  $\sigma_W^2$  требует использования статистик 2-го порядка (дисперсии классов), в то время как  $\sigma_B^2$  – статистик 1-го порядка (средние классов). Поэтому  $\eta$  является наиболее простой мерой, зависящей от величины порога  $D_p$ . Исходя из этого, оптимальный порог  $D_{opt}$  вычисляется по зависимости:

$$D_{opt} = \arg \left( \max_{0 < D_p < L-1} (\eta(t)) \right) = \arg \left( \max_{0 < D_p < L-1} (\sigma_B^2(t)) \right), \quad (7)$$

Поскольку дисперсия является мерой разброса уровней яркости вокруг среднего значения, то большее ее значение свидетельствует о большем отклонении от среднего. В связи с этим операция нахождения максимума в формуле для определения порога означает увеличение изолированности двух классов на бинаризованном изображении. Для бимодального изображения рассмотренный метод помещает порог между средними значениями ВК дефектов и фона так, чтобы максимизировать межклассовую дисперсию  $\sigma_B^2$ .

Но в свое время недостатком глобальных методов для вычисления порога является, то, что анализируется все изображение, в то время как при локальных методах порогового преобразования исследуются фрагменты изображения[4].

В методе пороговой обработки Эйквила используются два окна  $r$  и  $R$ , из которых большее по размерам (окно  $R$ ) служит для вычисления значения порога, в то время как меньшее (окно  $r$ ) определяет область изображения (рис.1), в которой будет использоваться полученный порог.

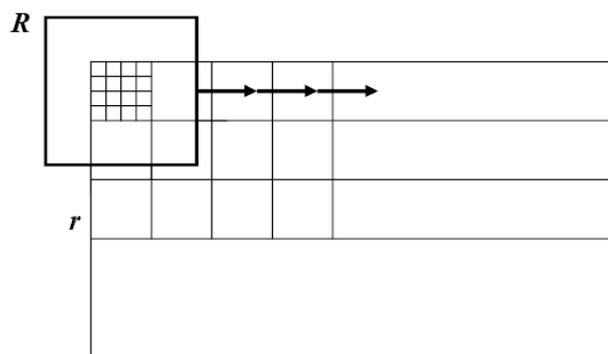


Рис. 1. Пороговые области

Оба окна перемещаются параллельно по изображению с шагом, равным размеру меньшего окна  $r$ , и каждый раз для всех элементов окна  $R$  вычисляется оптимальный порог по методу Отса.

Если вычисленные средние значения  $M_0$  и  $M_1$  различаются сильно и для них выполняется условие  $|M_0 - M_1| \geq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – заданный параметр, то пиксели внутри окна  $r$  подвергаются бинаризации в соответствии с вычисленным порогом  $D_p$ . Если же  $|M_0 - M_1| < \varepsilon$ , то все пиксели внутри окна  $r$  относятся к классу с ближайшим средним значением.

### **Заключение**

Таким образом, рассмотрены методы Отса и Эйквила, которые можно комбинировать, что позволит произвести сегментацию изображения на два класса и обосновать порога ВЧ ВК идентификации поверхностных дефектов листового проката цветных металлов.

### **Список литературы**

1 Соловьев, Н.А. Развитие АСУТП прокатного стана на основе выявления поверхностных дефектов металла методом вейвлет-преобразований видеоизображений / Д.П. Бугаев, Н.А. Соловьев // Специальный выпуск журнала «Известия Самарского научного центра Российской академии наук». – 2009. С.180-184

2 Соловьев, Н.А. Шумоподавление при распознавании поверхностных дефектов в технологии холодного листового проката / Д.П. Бугаев, Н.А. Соловьев // Совр. инф. технологии в науке, образов. практике. Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ. – Оренбург, 2010. – ISBN 978-5-7410-1078-5.

3 Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. Сойфер В.А. – М.: Физматлит, 2001. - 784 с.

4 Абламейко С.В. Обработка изображений: технология, методы, применение. Учебное пособие: / С.В. Абламейко, Д.М. Лагуновский - Минск: Амалфея, 2000. – 304 с.

УДК 629.014.17:681.5

В.В. Мартынов<sup>1</sup>, М.А. Пугин<sup>2</sup>, Ч.А. Яруллин<sup>1</sup>, А.М. Пугин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Ишимбай

<sup>2</sup>ООО «БашНИПИнефть», Уфа

<sup>3</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ «ХОЛОДНЫМ ЗАПУСКОМ» ДВИГАТЕЛЯ СНЕГОБОЛОТОХОДА В ОСОБО ТЯЖЕЛЫХ АВТОНОМНЫХ УСЛОВИЯХ**

### **Аннотация**

Работа посвящена разработке САУ запуском двигателя снегоболотохода (вездеходов повышенной проходимости) в особо тяжелых автономных дорожно-климатических условиях эксплуатации. Выполнено проектирование подсистемы автоматического управления температурой аккумуляторной батареи в теплоизолирующем контейнере.

## **Введение**

В последнее время растет интерес к транспортным средствам, предназначенным для работы в особо тяжелых дорожно-климатических условиях эксплуатации. К наиболее приспособленным к таким условиям автотранспортным средствам относятся двухзвенные снегоболотоходы «Витязь» (рис. 1). Расширение их использования позволит коренным образом изменить тактику выполнения работ в труднодоступных районах Крайнего Севера и Арктики, сделать ее менее зависящей от внешних погодных условий, времени года.

Постановка задач. В основе проблемы запуска двигателя в условиях низких температур лежат задачи утепления (снижение тепловых потерь) и автоматического подогрева агрегатов, критичных к воздействию низких температур. Наиболее чувствительными к воздействию низких температур являются: аккумуляторная батарея (АКБ) и система подачи топлива. Поэтому в рамках разработанных концептуальных подходов запуска двигателя поставлены следующие задачи по обеспечению работоспособности снегоболотоходов в данных условиях:

- разработать структурные и принципиальные схемы САУ подогрева и стабилизации температуры АКБ;

- разработать конструкцию теплоизолирующего контейнера (ТИК) для АКБ;

- исследовать тепловые процессы в теплоизолирующем контейнере с АКБ на основе их моделирования. Дать рекомендации по режимам подогрева с минимальным расходом энергоресурсов и максимальным временем поддержания заданной температуры АКБ и при различных температурах окружающей среды.

Разработка САУПД и САУ подогревом и стабилизации температуры АКБ. По эксплуатационному регламенту на запуск двигателя снегоболотоходов в автономном режиме при низких температурах (“холодный запуск”) отводится не более 30 минут. Поэтому “холодный запуск” двигателя является сложной теплоэнерготехнической задачей, решение которой возможно на основе применения систем автоматического управления подогревом и запуском двигателя (САУ ПД). Применение различных режимов работы разрабатываемой САУ ПД осуществляется согласно разработанным концептуальным подходам с учетом окружающих условий и периодичности рабочих состояний двигателя [1].



*Рис. 1. Двухзвенный снегоболотоход «Витязь»*

1. Запуск двигателя при полностью остывшей машине, при температуре всех ее систем равной температуре окружающей среды (до  $-500\text{C}$ ) – собственно холодный запуск двигателя. Рекомендуемым способом запуска является запуск с помощью специальной автономной энергоустановки на легком топливе.

2. Запуск после кратковременного прерывания в работе. За время паузы температура систем, от работы которых зависит запуск двигателя, не опускается ниже критического значения. Запуск осуществляется штатным способом. Снижение температуры ниже критических значений приводит к перерасходу ресурсов, превышению допустимого времени запуска. Допустимое время прерывания в работе зависит от окружающих условий, температуры двигателя и является расчетным. Если оно превышает допустимое, то работа САУ ПД производится по 3 режиму.

3. С учетом длительности стоянки вездехода и внешних температурных условий проводится расчет энергоресурсов, необходимых на поддержание температуры двигателя не ниже заданного граничного значения. При расчетном расходе ресурсов меньшем, чем требуется при холодном запуске, осуществляется переход в ждущий режим. Работа САУ ПД в этом режиме не допускает снижения температуры ниже заданных граничных значений путем периодических включений двигателя (или пусковой энергоустановки). Целесообразность и частота промежуточных запусков двигателя определяется сравнением расхода ресурсов с расходом при холодном запуске.

Разработанная блок-схема работы адаптивной САУ подогревом силовых агрегатов и холодным запуском основного двигателя приведена на рис. 2.

Анализ контроллеров температуры показал что, несмотря на то, что ассортимент промышленных контроллеров очень большой, существует не так много контроллеров работающих от напряжения 24 В и предназначенных для измерения температуры. Кроме того в паспортных данных контроллеров указа-

но напряжение питания 24 В, но подразумевается питание контроллера стабилизированным напряжением (производитель аннулирует гарантию при питании от посторонних источников энергии). Значит, даже для готового промышленного контроллера потребуется блок питания способный обеспечить контроллер напряжением требуемого качества от бортовой сети снегоболотохода.

Существует достаточно много автомобильных систем климат контроля, которые могли бы быть использованы для поддержания требуемой температуры в аккумуляторном отсеке. Но большинство из них питаются от напряжения 12 В. Остальные, же узкоспециализированы (не могут запускать двигатель, не имеют настроек для работы по алгоритму). Поэтому рекомендуется использовать обычный биметаллический термостат в связке с несколькими реле он может обеспечить поддержание заданной температуры в отсеке. Однако при этом невозможно задавать алгоритм работы, кроме того механические датчики имеют низкую надёжность. Из вышеизложенного видно, что для подогрева АКБ в утеплённом теплоизолирующем контейнере, необходимо разработать принципиальную электрическую схему контроллера удовлетворяющую предъявляемым требованиям.

Для управления температурой АКБ в ТИК разработана автоматизированная система в основу которой заложен микроконтроллер *PIC16F877A*. Управление температурой АКБ в теплоизолирующем контейнере с помощью контроллера позволило повысить коэффициент готовности оборудования, повысить надёжность и свести к минимуму аварийные ситуации. Микроконтроллер регулирует мощность ТЭНов посредством ШИМ. Плавное изменение мощности ТЭНа в зависимости от напряжения бортовой сети и температуры ТЭНа позволяет предотвратить разряд АКБ на ТЭН и колебательные процессы в системе электропитания автомобиля, при максимальном использовании энергии от генератора. Программа для микроконтроллера написана на языке С в свободно распространяемой среде разработки *MPLAB 8.56* с применением надстройки *HI-TECH C Compiler for PIC10/12/16 MCUs (Lite Mode) V9.70*. Предусмотрена запись температуры ТЭНов, температуры АКБ, мощности ТЭНов, напряжения бортовой сети на ПК с контроллера через *USB*. Программа для ПК написана на языке *Object Pascal* в свободно распространяемой среде разработки *Turbo Delphi Explorer*.

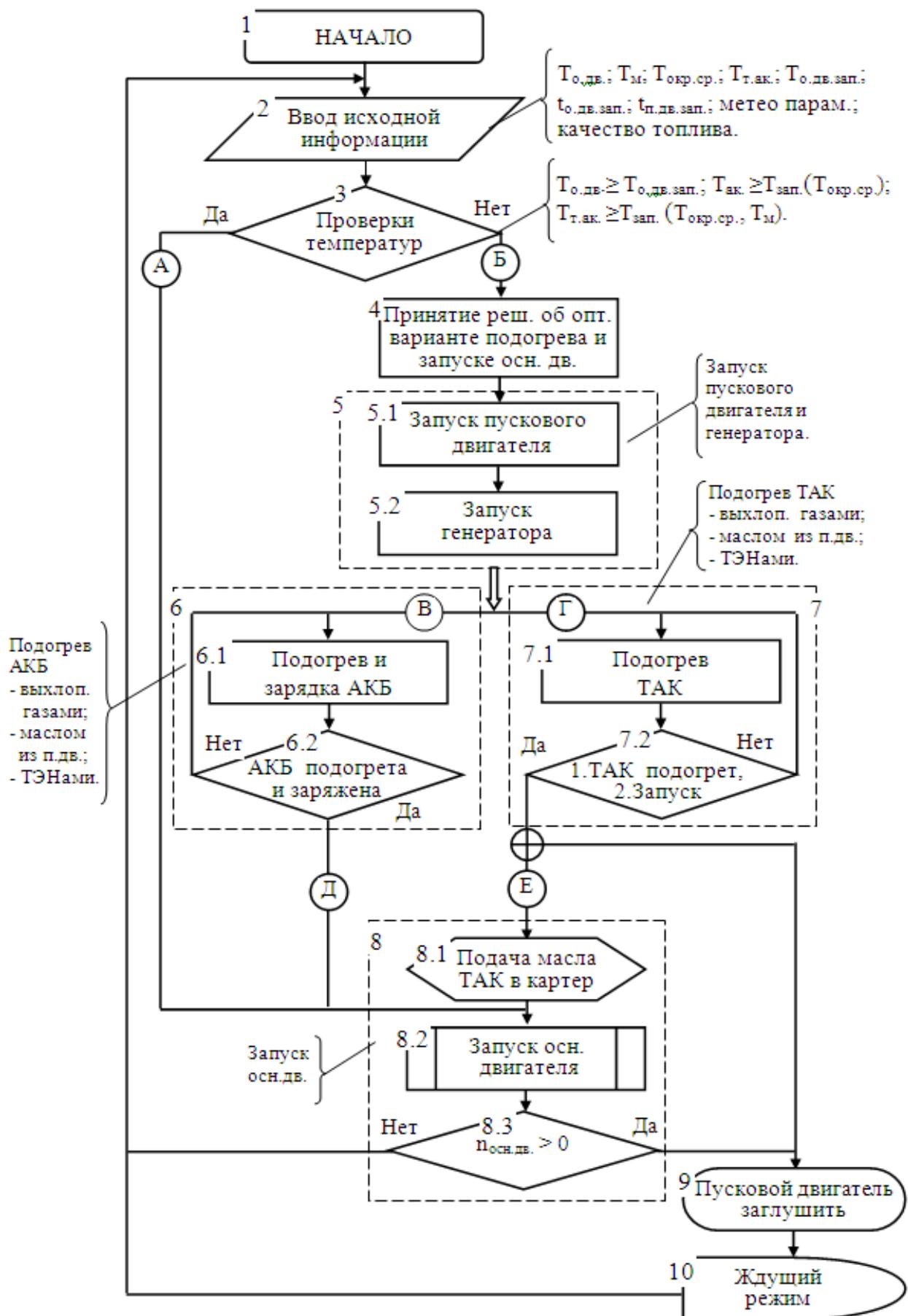


Рис. 2 Блок-схема работы САУ подогревом силовых агрегатов и холодным запуском двигателя снегоболотохода

## **Результаты работы**

1. Анализ зависимости ёмкости АКБ различных типов от температуры показал, что снижение ёмкости при низких температурах происходит у всех широко распространённых типов АКБ. Показано, что устанавливаемые на снегоболотоходе АКБ марки 6 СТ 190 имеют неудовлетворительные технические характеристики, в том числе массогабаритные показатели.

2. Патентные исследования показали, что созданные на данный момент теплоизолирующие контейнеры и системы подогрева не подходят для стабилизации температуры АКБ в ТИК. Из рассмотренных вариантов подогрева выбран наиболее простой в изготовлении – подогрев ТЭНами с питанием от генератора или внешнего источника электрической энергии.

3. Для оценки охлаждения, времени выхолаживания АКБ и отладки методики выполнен ряд расчётов нестационарного температурного поля АКБ с использованием пакета “POLYFEM”.

4. Выполненное моделирование тепловых режимов показало, что для поддержания температуры АКБ в ТИК на уровне  $+20^{\circ}\text{C}$  при температуре окружающей среды  $-30^{\circ}\text{C}$  требуется ТЭН мощностью 21 Вт. Разработана структурная схема САУ температурой АКБ в ТИК. В результате моделирования данной схемы определены оптимальные пороги срабатывания для термостатов ТЭНа ( $T_{H}=+50^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{L}=+49^{\circ}\text{C}$ ). Разработаны и испытаны две принципиальные электрические схемы для стабилизации температуры АКБ в ТИК. Схема блока стабилизации температуры остаётся работоспособной при температурах окружающей среды до  $-55^{\circ}\text{C}$ , ошибка по температуре ТЭНа составляет  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , а по температуре АКБ  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , имеется перерегулирование по температуре ТЭНа на  $10^{\circ}\text{C}$ , что не позволяет задать максимально высокую температуру ТЭНа. Схема на базе микроконтроллера PIC16F877A лишена данных недостатков. Также в ней реализована возможность задавать настройки управления подогревом с ПК, и записывать все снимаемые показания для последующего анализа.

5. Разработана конструкция теплоизолирующего контейнера, обеспечивающая совместно с САУ температурой, рабочие режимы АКБ при температуре окружающей среды  $-30^{\circ}\text{C}$  до 7 суток.

## **Список литературы**

1. Проектирование системы сохранения теплоты и подогрева для поддержания пусковых характеристик АКБ. / Отчет по научно-исследовательской работе. Ч.А.Яруллин, М.А.Пугин, В.В.Мартынов и др. Государственный регистрационный номер НИОКР 01201151937. Интернет-номер И101222122945. Дата регистрации 09.02.2011. Филиал УГАТУ в г. Ишимбае. 2010. 138с.

2. Яруллин Ч.А., Пугин А.М., Мартынов В.В. и др. Об адаптивной системе управления “холодным запуском” двигателя вездехода в автономном режиме. Научно-технические материалы в машиностроении: материалы научно-практической конференции (г. Ишимбай, 14-15 мая 2009 г.) Уфа: УГАТУ, 2010. – С. 70.

3. Яруллин Ч.А., Пугин А.М., Мартынов В.В. Обеспечение работоспособности аккумуляторных батарей снегоболотоходов в условиях низких темпера-

тур. Молодёжные инновации в машиностроении: сборник тезисов межвузовской студенческой НПК (г. Ишимбай, 9-14 апреля 2012 г.). Ишимбай: УГАТУ, 2012. – С. 10.

4. Яруллин Ч.А., Пугин А.М., Мартынов В.В., Коростелёва С.В. Теплоизолирующий контейнер для аккумуляторных батарей снегоболотоходов. Научно-технические технологии в машиностроении: материалы научно-практической конференции (г. Ишимбай, 10-12 мая 2012 г.). – Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 62-64.

5. Яруллин Ч.А., Пугин А.М., Летунов И.А., Мартынов В.В. Сравнительная характеристика аккумуляторных батарей для применения в снегоболотоходах «Витязь». Научно-технические технологии в машиностроении: материалы научно-практической конференции (г. Ишимбай, 10-12 мая 2012 г.). – Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 61-62.

УДК 519.7, 517.9

О.Н. Масина, Е.В. Игонина, А.В. Щербаков

*Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВЕРНУТЫМ МАЯТНИКОМ С ПОМОЩЬЮ ПОСТРОЕНИЯ ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА**

### **Аннотация**

Для изучения устойчивости перевернутого маятника на тележке построен логический регулятор на основе схемы параллельно распределенного выравнивания. Найдена функция Ляпунова, представленная в виде набора нескольких квадратичных функций Ляпунова, нахождение которых заключается в вычислении соответствующих положительно определенных матриц.

### **Введение**

При изучении систем управления актуальной проблемой является исследование устойчивости управляемых маятниковых систем [1–7]. Исследование устойчивости маятников проводится как классическими (метод функций Ляпунова), так и современными методами (построение логического регулятора). Достаточные и необходимые условия устойчивости управляемых систем получены в работе [8] с помощью обобщенных функций Ляпунова. В [9] показана эффективность использования первого и второго методов Ляпунова в сочетании с другими методами для исследования устойчивости перевернутого маятника. Вопросам устойчивости маятниковых систем с помощью построения логического регулятора посвящены работы [9–11] и другие работы.

Эффективным методом изучения устойчивости является построение модели Такаги–Сугено, которая относится к моделям интеллектуального управления [7]. Указанная модель описывается нечеткими правилами вида если...то, которые представляют собой локальные линейные отношения вход–

выхода модели [5]. Устойчивость модели Такаги–Сугено может быть исследована с помощью функций Ляпунова и свойств линейных матричных неравенств [5, 9, 11].

В настоящей работе с помощью процедуры параллельно распределенного выравнивания (*PDC*) построен логический регулятор для исследования устойчивости перевернутого маятника на тележке. Каждое правило регулятора построено из соответствующего правила модели Такаги–Сугено. Определена нечеткая функция Ляпунова в виде суммы двух квадратичных функций Ляпунова.

### Модель Такаги-Сугено и *PDC*-регулятор

Модель Такаги–Сугено задается следующими правилами [5]:

П<sub>*i*</sub>: ЕСЛИ  $z_1(t)$  есть  $M_{i1}$  и ... и  $z_p(t)$  есть  $M_{ip}$ ,

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t),$$

ТО  $y(t) = C_i x(t)$ , (1)

$$i = 1, 2, \dots, r,$$

где  $z(t) = (z_1(t), \dots, z_p(t))$  – вектор предпосылок,  $M_{ip}$  – нечеткое множество,  $x(t) \in R^n$  – вектор состояния,  $u(t) \in R^m$  – входящий вектор,  $y(t) \in R^q$  – выходящий вектор,  $r$  – число правил,  $A_i \in R^{n \times n}$ ,  $B_i \in R^{n \times m}$ ,  $C_i \in R^{q \times n}$ . Предполагается, что исходные переменные не являются функциями от входящих переменных  $u(t)$ . Правая часть в (1) представима в виде

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}, \\ y(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t))$ ,  $h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))}$ ,

$M_{ij}(z_j(t))$  – степень принадлежности элемента  $z_j(t)$  к множеству  $M_{ij}$ .

При изучении устойчивости модели (1) строится стабилизирующий логический регулятор на основе схемы параллельно распределенного выравнивания [6]. Каждое правило регулятора строится из соответствующего правила модели Такаги–Сугено. Образующийся общий логический регулятор, являющийся нелинейным, представляет собой сочетание отдельных линейных регуляторов. При этом логический регулятор использует те же нечеткие множества, что и модель в исходных частях, и в расчет берется только локальная эффективность каждого правила.

Для модели (1), (2) нечеткий PDC-регулятор описывается следующим образом [6]:

$$u(t) = -\frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))\{A_i x(t) + B_i x(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = -\sum_{i=1}^r h_i(z(t))F_i x(t), \quad (3)$$

где  $F_i$  – коэффициенты усиления. Согласно (1)–(3), требуется найти соответствующие коэффициенты усиления  $F_i$ , обеспечивающие устойчивость модели (2).

### Построение PDC-регулятора для анализа устойчивости системы управления перевернутым маятником

Рассматривается система управления перевернутым маятником, смонтированным на тележке, описываемая уравнениями [4]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{g \sin(x_1(t)) - \frac{amlx_2^2(t) \sin(2x_1(t))}{2}}{\frac{4l}{3} - aml \cos^2(x_1(t))} - \frac{a \cos(x_1(t))u(t)}{\frac{4l}{3} - aml \cos^2(x_1(t))}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $x_1(t)$  – угол (в радианах) отклонения маятника от вертикальной оси,  $x_2(t)$  – угловая скорость,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – гравитационная постоянная,  $m$  – масса маятника,  $M$  – масса тележки,  $2l$  – длина маятника,  $u$  – сила, прикладываемая к тележке (в Ньютонах),  $a = \frac{1}{m + M}$ . Задача управления для регулятора

заключается в необходимости постоянно сохранять желаемое вертикальное положение маятника.

Отметим, что в работе [10] для решения указанной задачи построена модель Такаги–Сугено, состоящая из 16 правил. С помощью процедуры параллельно распределенного выравнивания число правил в настоящей работе уменьшено до двух. Модель Такаги–Сугено в этом случае задается следующим образом:

П<sub>1</sub>: ЕСЛИ  $x_1(t)$  приблизительно равно 0, ТО  $\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t)$ ,

П<sub>2</sub>: ЕСЛИ  $x_1(t)$  приблизительно равно  $\pm \frac{\pi}{2}$   $\left( |x_1| < \frac{\pi}{2} \right)$ ,

ТО  $\dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t)$ ,

где матрицы  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  определены соответствующим образом. PDC-регулятор определяется правилами вида:

П<sub>1</sub>: ЕСЛИ  $x_1(t)$  приблизительно равно 0, ТО  $u(t) = F_1 x(t)$ ,

П<sub>2</sub>: ЕСЛИ  $x_1(t)$  приблизительно равно  $\pm \frac{\pi}{2}$   $\left( |x_1| < \frac{\pi}{2} \right)$ , ТО  $u(t) = -F_2 x(t)$ .

Для уравнений (4) общий PDC-регулятор представим в виде  $u(t) = -h_1(x_1(t))F_1x(t) - h_2(x_2(t))F_2x(t)$ , где  $h_1$  и  $h_2$  – функции принадлежности для правил  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  соответственно, и  $h_1+h_2=1$ .

Нечеткая функция Ляпунова представлена в виде  $V(x(t)) = h_1(x_1(t))x^T(t)P_1x(t) + h_2(x_2(t))x^T(t)P_2x(t)$ , где  $P_1, P_2$  – положительно определенные матрицы. Показано, что достаточные условия устойчивости могут быть сформулированы в терминах допустимости набора линейных матричных неравенств.

Для нахождения соответствующих матриц проведена серия модельных расчетов в системе компьютерной математики MATLAB. При значениях параметров  $m = 2$  кг,  $M = 8$  кг,  $2l = 1$  м и для начальных условий вида  $x(0) = (\pi/6, 0)^T$ ,  $x(0) = (\pi/4, 0)^T$  и  $x(0) = (\pi/3, 0)^T$  найдены соответствующие матрицы  $F_1, F_2, P_1$  и  $P_2$ .

### **Выводы**

Анализ устойчивости перевернутого маятника с помощью синтеза логического регулятора позволяет свести исследование устойчивости к построению продукционных правил вида если...то и нахождению соответствующих положительно определенных матриц. Рассмотренный подход позволяет улучшить динамические характеристики объектов управления, функционирующих в условиях неопределенности входной информации.

Результаты, полученные в настоящей работе, являются продолжением работ [10, 11] и могут быть использованы для совершенствования технических систем управления.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №13-08-00710-а.

### **Список литературы**

1. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
2. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 198 с.
3. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.
4. Формальский А. М. Перевернутый маятник на неподвижном и подвижном основании // ПММ. 2006. Т. 70. № 1. С. 62–71.
5. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Trans. Syst., Man and Cyber. 1985. V. 15. P. 116–132.
6. Abdelmalek I., Golea N., Hadjili M. A new fuzzy Lyapunov approach to non-quadratic stabilization of Takagi-Sugeno fuzzy models // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. 2007. V. 17. № 1. P. 39–51.
7. Васильев С.Н. К интеллектному управлению // Нелинейная теория управления и ее приложения. М.: Физматлит, 2000. С. 57 – 126.

8. Шестаков А.А. Обобщенный прямой метод Ляпунова для систем с распределенными параметрами. М.: УРСС, 2007. – 320 с.

9. Масина О.Н., Дружинина О.В. Моделирование и анализ устойчивости некоторых классов систем управления. М.: ВЦ РАН, 2011. – 164 с.

10. Игонина Е.В., Пирожок А.А. Синтез и устойчивость системы управления перевернутым маятником // Труды Института системного анализа Российской академии наук. Динамика неоднородных систем. 2010. Т. 53(3). С. 47–52.

11. Игонина Е.В., Масина О.Н., Мухин А.В. Анализ устойчивости и стабилизации системы управления перевернутым маятником с помощью функций Ляпунова и регулятора Такаги–Сугено // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. 2012. Вып. 14. С. 135–144.

УДК 004.89, 007.52, 656.05

И.С. Мезенцев

*Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург*

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В УПРАВЛЕНИИ ДОРОЖНЫМИ СВЕТОФОРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

### **Аннотация**

Автором ставится задача оценки эффективности использования аппарата нечеткой логики в системах управления дорожным движением, а также генетических алгоритмов для оптимизации параметров нечетких регуляторов, описывается модель для проведения экспериментов и структура системы управления.

### **Введение**

В последние десятилетия в России наблюдается интенсивный рост уровня автомобилизации – числа автотранспортных средств на дорогах. Рост этого показателя приводит к увеличению интенсивности движения в городах, что вызывает обострение транспортных проблем. Особенно остро они проявляются в узлах улично-дорожной сети (перекрестках) и влекут за собой задержки в движении, повышенный расход топлива, износ узлов и агрегатов транспортных средств, рост эмиссии выхлопных газов и загрязнение окружающей среды.

В качестве одного из способов решения обозначенной проблемы выступают автоматизированные системы управления дорожным движением (АСУ ДД). Наиболее эффективно АСУ ДД функционируют в тех случаях, когда имеют обратную связь по параметрам транспортных потоков, обеспечиваемую посредством детекторов транспорта, что позволяет оперативно оптимизировать работу светофорной сигнализации. Такое управление называется адаптивным [1].

Зачастую АСУ ДД располагает неполной или неточной информацией о параметрах транспортных потоков в связи с недостаточным количеством детекторов транспорта. Решать задачи управления в условиях неполноты информа-



мени количество автомобилей, ожидающих проезда на каждой из полос, с некоторой вероятностью увеличивается на единицу. По этому же принципу организован проезд перекрестка по разрешающему сигналу светофора – за каждый заданный интервал горения разрешающего сигнала количество автомобилей, ожидающих у стоп-линии на соответствующей полосе, уменьшается на единицу.

Проезд перекрестка транспортными средствами организован в четыре фазы таким образом, чтобы обеспечить бесконфликтное движение транспортных потоков в каждой из фаз. В фазе №1 происходит проезд перекрестка правоповоротными потоками и потоками, движущимися в прямом направлении, а также пропуск пешеходных потоков по улице «север-юг». В фазе №2 прекращается движение едущих прямо автомобилей, и включается зеленый сигнал для левоповоротных потоков. Фазы № 3 и № 4 повторяют описанную для улицы «север-юг» схему движения для соответствующих направлений улицы «восток-запад».

Автором предлагается использование нечеткого регулятора для управления длительностью основных тактов (разрешающих сигналов) светофорного цикла.

### **Постановка задачи по построению нечеткого регулятора**

Так как временные характеристики работы светофора, выступающие в качестве выходных переменных процесса управления, являются дискретной величиной, в модели предлагается применение нечеткого регулятора, использующего упрощенный алгоритм нечеткого вывода типа Суджено [6]. Количество выходных переменных регулятора должно соответствовать количеству фаз светофорного цикла. В рассматриваемой системе оно равно четырем.

К входным переменным процесса управления можно отнести количество автомобилей, ожидающих проезда перекрестка на каждой из полос, среднюю пространственную скорость потоков, время ожидания и другие параметры транспортных потоков. Количество входных переменных определяется количеством полос для движения транспорта.

Целью исследования ставится минимизация количества автомобилей, ожидающих проезда, в связи с чем, в проектируемом нечетком регуляторе в качестве входного параметра достаточно использовать только количество автомобилей, ожидающих проезда перекрестка перед стоп-линией. Но даже при таком ограничении в системе будет 12 входных переменных – по одной на каждую из полос.

Однако при выбранной схеме организации движения в качестве входного параметра можно использовать сумму количества автомобилей, движущихся во встречных направлениях, так как они бесконфликтно пропускаются в одной фазе. Таким образом, в описываемой модели будет шесть входных переменных. Структура нечеткого регулятора представлена на рис. 2.

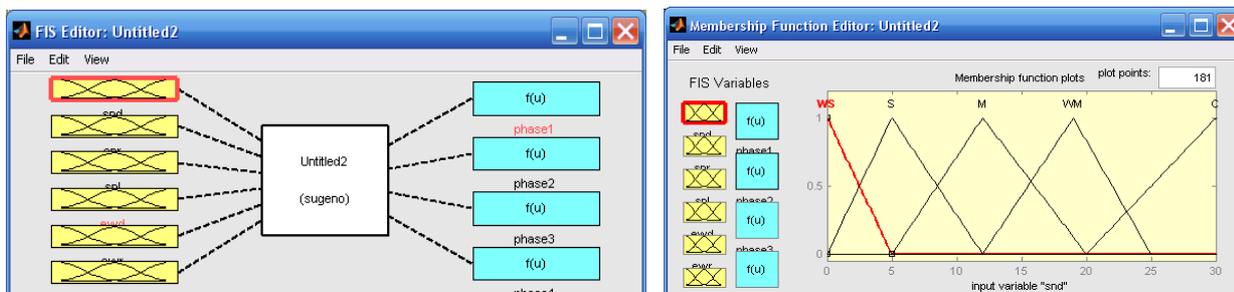


Рис. 2. Структура нечеткого регулятора в окне расширения *Fuzzy Logic Toolbox* (слева) и структура одной из входных переменных (справа)

Наибольшие затруднения при проектировании нечеткого регулятора вызывает процесс создания базы знаний системы нечеткого вывода. Для построения базы правил в системе управления предлагается использовать комбинированный метод, включающий экспертные знания и интеллектуальную систему извлечения знаний, основанную на генетических алгоритмах [7]. Использование такой системы позволяет построить внутренне непротиворечивую и логически полную, базу знаний, оптимизированную под конкретную модель перекрестка.

### Заключение

Построение описанной системы позволяет оценить эффективность решения задачи управления дорожным движением методами искусственного интеллекта: применением нечеткой логики для управления параметрами светофорного регулирования и генетических алгоритмов для оптимизации параметров нечеткого регулятора.

### Список литературы

1. Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. – Технические средства организации дорожного движения: Учеб. для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.: ил. ISBN 5-94628-11-9.
2. Р.А. Алиев. Управление производством при нечёткой исходной информации. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.: ISBN:5-283-01461-4.
3. В. Дьяконов, В. Круглов. – Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – Санкт-Петербург: Питер, 2001. – 480 с.: ISBN 5-318-00004-5.
4. Мезенцев И. С., Тарасян В. С. Применение адаптивного управления светофорным объектом для минимизации задержки транспортных средств // Вестник науки Костанайского социально-технического университета имени академика Зулхарнай Алдамжар. — Костанай : КСТУ, 2012. — № 3 — С. 98–105.
5. Вовк О.Л., Федяев О.И. Исследование алгоритмов нечёткого вывода в системах управления трудноформализуемыми объектами. // Сборник трудов магистрантов Донецкого национального технического университета. – Донецк. ДонНТУ Министерства образования и науки Украины, 2002. – Вып. 1. – С. 895–903.

6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH : СПб: БХВПетербург, 2005. 736 с. ISBN 5-94157-087-2.

7. Тарасян В.С. Построение системы нечеткого управления при помощи генетических алгоритмов. // Транспорт XXI века: Исследования, инновации, инфраструктура: Материалы научн.-техн. конф., посв. 55-летию УрГУПС. – Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – Вып. 97(180). Т. 2. – С. 621-626.

УДК 62-50

Ю.В. Морозов

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

## **СИНТЕЗ КВАЗИ-ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕСНЫМ РОБОТОМ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫПУКЛЫХ ФАЗОВЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

### **Аннотация**

Рассматривается задача управления колесным роботом в случае, когда движение происходит вдоль прямой линии. В данной работе строится граница области притяжения в пространстве «боковое отклонение – угловое отклонение», когда на соответствующие переменные введены совместные выпуклые фазовые ограничения, а закон управления для любого начального условия из внутренности данной области гарантирует попадание в начало координат за конечное время.

### **Введение**

Выход колесного робота на прямую и стабилизация движения по ней является известной задачей, которая рассматривалась во многих работах. Однако стоит добавить требование конечности переходных процессов при ограниченном ресурсе управление и число работ с такой постановкой задачи резко сокращается. Наиболее близкая из найденных автором постановка задачи, которая рассматривается в данной работе, встречается в [3], где она приведена как пример применения подхода, разработанного. Основная идея статьи [3] заключается в модификации закона управления, который является оптимальным по быстродействию для двойного интегратора [1]. Вопрос о том, насколько синтезированный закон управления близок к оптимальному в некотором смысле, не рассматривается, кроме того, в работе присутствуют только отдельные фазовые ограничения. Дело в том, что наличие совместных ограничений на фазовые переменные иногда более оправдано, чем введение отдельных фазовых ограничений, однако требует дополнительного анализа системы. Наиболее простыми из таких ограничений является ромб или окружность в фазовом пространстве состояний системы.

Предположим, что существует некоторый закон управления, зависящий от состояния системы и некоторого параметра, характеризующего близость данного закона управления к оптимальному в некотором смысле закону управления. Будем называть закон управления квази-оптимальным по быстродействию, если существует некоторое критическое значение параметра в

синтезированном законе управления, при котором он становится оптимальным по быстродействию.

### Постановка задачи

Движение колесного робота в отклонениях можно записать в виде

$$\dot{x} = y, \dot{y} = \left(\sqrt{1+y^2}\right)^3 u + \delta(x, y), \quad (1)$$

где координаты  $(x, y)^T$  имеют смысл бокового и углового отклонения соответственно, через штрих обозначена производная по некоторой независимой переменной<sup>2</sup>, означающей пройденный роботом путь, внешнее произвольное возмущение  $|\delta(x, y)| < D$ . Для простоты, считаем что  $D = 0$ . Управление  $u$  ограничено величиной  $U$ , т.е.  $|u| < U$ .

Из теоремы 1 [4] следует локальная устойчивость системы (1), замкнутой управлением

$$u = -U \operatorname{sign}(S), S = U_\lambda x + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+y^2}}\right) \operatorname{sign}(y), U_\lambda = \frac{U}{1+\lambda}, \lambda > \frac{D}{U-D}. \quad (2)$$

Здесь и далее  $\operatorname{sign}(s) = \{-1, 1, s = 0; 1, s > 0; -1, s < 0\}$  [2].

Напомним, что данный закон управления применим только в неограниченной незамкнутой области, которая представляет собой множество  $G$  всех траекторий, испущенных из каждой полутраектории из начала координат при постоянном максимальном управлении соответствующего знака (Замечание~1 к теореме~3.25 [1]),

$$G(x, y) = \left\{ (x, y) \in R^2 : |x| < x/U \left( (1+y^2)^{-0.5} + 1 + \lambda \right) \right\} \quad (3)$$

Пусть далее, даны  $n$  фазовых ограничений на переменные  $(x, y)^T$ , которые можно представить в виде:

$$q_i |x_i| + |y_i| < r_i, r_i > 0, i = \overline{1, n} \quad (4)$$

Тогда обозначим область в фазовом пространстве, на которой может существовать система через  $Q(x, y) = \bigcap_{i=1}^n Q_i$ ,  $Q_i = \left\{ (x_i, y_i) \in R^2 : q_i |x_i| + |y_i| < r_i \right\}$ .

Поставим задачу поиска области притяжения  $W(x, y) \subseteq G(x, y) \cap Q(x, y)$  для системы (1), замкнутой квази-оптимальным по быстродействию законом управления (2). Очевидно, что закон управления будет оптимальным по быстродействию для системы (1), если  $\delta(x, y) = \operatorname{sign}(S(x, y))$ , а  $\lambda = 0$ .

<sup>2</sup> в зависимости от путевой системы координат получает разные интерпретации данной переменной [5],[6], однако при движении вдоль прямой все они эквивалентны.

## Построение области притяжения

Предположим, что существует только одно активное ограничение  $Q_1$

Найдем сначала точки касания  $Q_1$  и фазовых траекторий.

В силу симметрии при решении уравнения необходимо потребовать выполнения условий ( $y < 0, S(x, y) > 0$ ) имеем

$$(1 + y^2)^{3/2} v + yq_i = 0, y < 0, S(x, y) > 0 \quad (5)$$

Из геометрии следует, что возможно 3 типа решений: отсутствие решения, одна точка (касательная в точке перегиба совпадает с наклоном

прямой фазового ограничения  $y^* = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{5}), x^* = \frac{y^*}{q_i}$ ), две точки – точка

касания вогнутости и точка касания выпуклости фазовой траектории (касание фазовой траектории фазового ограничения изнутри). Далее под фазовой траекторией будем понимать кривую, заданную уравнением

$$P(x_0, y_0, x, y) = \left\{ (x, y) \in R^2 : Ux + \left( a(x_0, y_0) - (1 + y^2)^{-0.5} \right) = 0 \right\}, \quad (6)$$

где параметр  $a$  определяет сдвиг фазовой траектории вдоль оси  $x$ . Рассмотрим каждый случай подробно:

1) Если точек касания нет, то правая граница области притяжения состоит из фазовой траектории  $P(x_{11}, y_{11}, x, y)$ , испущенной из точки  $(x_{11}, y_{11})^T$ , которая является решением системы

$$y = q_i x - r_i, vx + \left( 1 - (1 + y^2)^{-0.5} \right) = 0, y < 0, \quad (7)$$

и 2-х отрезков фазового ограничения, с координатами:  $\{(0, -r_i)^T, (x_{11}, y_{11})^T\}$ ,  $\{(0, r_i)^T, (x_{11}, -y_{11})^T\}$ . Левая граница симметрична правой относительно начала координат и имеет с ней общие точки  $(0, -r_i)^T, (0, +r_i)^T$ .

2) Случай с одним решением аналогичен случаю 1)

3) В данном пункте считаем, что  $x > 0$ . Случай  $x < 0$  рассматривается аналогично. Из двух решений уравнения (5) выбираем то,  $y_{12} = \min(|y_1|, |y_2|)$  которого модуль меньше. Обозначим нужную точку касания, как  $(x_{12}, y_{12})^T$ . Испускаем из нее фазовую траекторию  $P(x_{12}, y_{12}, x, y)$ , которая пересечет фазовое ограничение (4) в точке  $(x_{13}, y_{13})^T$ .

Далее испускаем траекторию  $P(x_{14}, y_{14}, x, y)$ , из точки  $(x_{14}, y_{14})^T$ , которая является решением системы (7). Остается найти точку  $(x_{15}, y_{15})^T$  пересечения траектории  $P(x_{14}, y_{14}, x, y)$  и фазового ограничения (4). Итак, правая граница области притяжения в данном случае состоит из фазовых частей траектории  $P(x_{12}, y_{12}, x, y)$ ,  $P(x_{14}, y_{14}, x, y)$  и фазовых уравнений (4), разделенных следующими точками:

$\{(0, -r_i)^T, (x_{14}, y_{14})^T, (x_{15}, y_{15})^T, (x_{12}, y_{12})^T, (0, +r_i)^T\}$ .

Левая граница симметрична правой относительно начала координат и имеет с ней общие точки  $(0, -r_i)^T, (0, +r_i)^T$ .

## Численное моделирование

Для моделирования были выбраны следующие параметры:

$$U = 0.2; \lambda = 0.05; q_1 = 1.5; r_1 = 7q_1; (x_0, y_0) = (2, 2).$$

Результаты моделирования представлены на рис. 1.

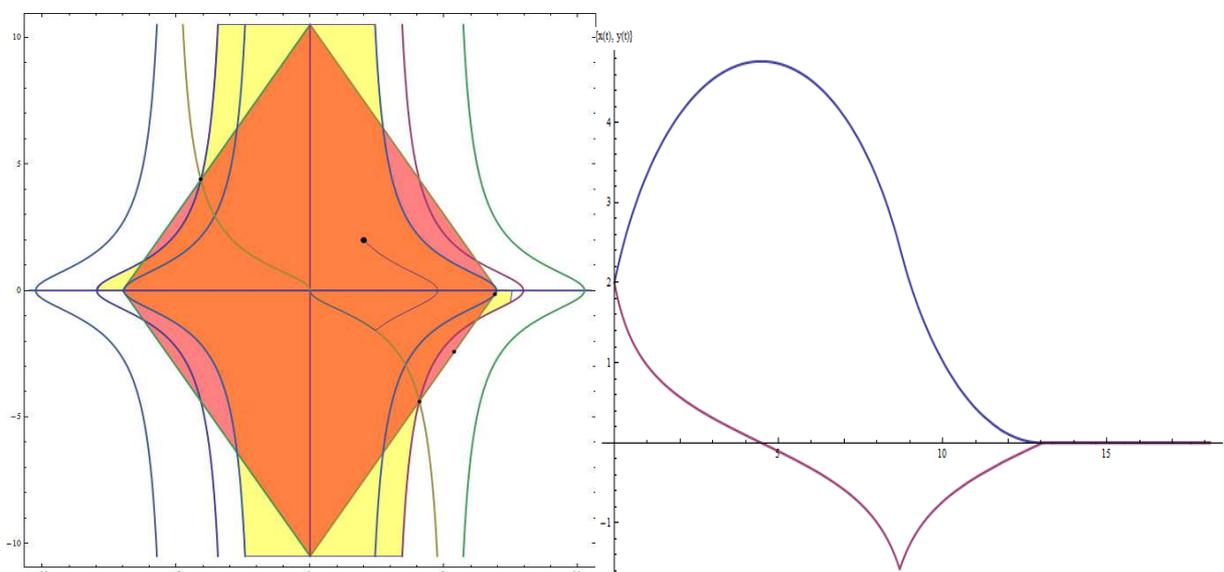


Рис. 1.а. Область притяжения (оранжевая), внутренность фазовых ограничений (красная), желтая линия – кривая разрыва, линия из черной точки – фазовая траектория системы (1) замкнутая управлением (2)

Рис. 1.б. Решения  $x(t)$  – синий,  $y(t)$  – пурпурный) системы (1) – (2)

Предложенный алгоритм, может быть применен для случая, когда ограничений больше чем одно, но они симметричные. Представляет интерес построение области притяжения для случая несимметричных выпуклых ограничений.

## Список литературы

1. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. Издание второе, переработанное и дополненное. - М.: Наука, 1969. - 408 с.
2. Филиппов А. Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. – М.: Наука, 1985. - 224 с.
3. Матюхин В.И. Стабилизация движений лагранжевых систем за конечное время переходного процесса//Докл. РАН. 1997. Т. 353, № 4. С. 484-487.
4. Морозов Ю.В. Quazi-Time-Optimal Control of wheeled vehicle // Тез. докл. Международной конференции “Моделирование, управление и устойчивость” (MCS-2012), Крым, Севастополь, 2012, С.73-74.
5. Пестерев А.В. Эллипсоидальные аппроксимации области притяжения в задаче путевой стабилизации колесного робота с ограниченным управлением//ТиСУ, 2012. № 4. С.131-144.
6. Rapoport L.B., Morozov Yu.V.} Estimation of Attraction Domains in Wheeled Robot Control Using Absolute Stability Approach// IFAC-2008. Seoul. P. 5903-5908.

УДК 004.4

А.М. Морозов<sup>1</sup>, И.С. Понуровский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический институт,  
Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский институт,  
Пермь

## **«ГРИН»–СИСТЕМА ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ НА ПЛИС *FPGA***

### **Аннотация**

В статье рассказывается об энергосберегающей системе логического управления, работающей на микропрограммно–аппаратном уровне. Выдвигаются основные требования, которым должна удовлетворять подобная система, а также дается математическая постановка задачи энергосбережения для описываемой системы.

### **Введение**

В настоящее время активно ведутся исследования в области так называемых «*Green Computing*» или «Зеленых вычислений». Зеленые вычисления – это область *IT*, изучающая проектирование, производство, использование и утилизацию вычислительного оборудования и компьютерных подсистем (мониторов, принтеров, устройств хранения, обработки и передачи данных) [1].

В пользу актуальности проблемы свидетельствует множество фактов, выявленных недавними исследованиями. Например, пиковая нагрузка на электростанции, связанная с работой серверов и центров обработки данных, составила в 2007 году 7 гигаватт [2]. При выполнении одного запроса в *Google* в окружающую среду выделяется примерно 7 грамм углекислого газа [3]. Суммарно по всему миру в год выбрасывается 20-50 тонн электронных отходов [4].

В рамках зеленых вычислений среди всего прочего развивается направление разработки энергосберегающих систем логического управления. Снижение энергопотребления в них достигается за счет введения оптимального уровня избыточности.

В таких системах используется аппаратное вычисление логических функций на основе логических элементов, которые строятся, как постоянное запоминающее устройство ПЗУ (*LUT – Look Up Table*). Для четырех переменных ПЗУ представляет собой мультиплексор 16–1 (дерево мультиплексоров), входы данных которого настраиваются так называемыми конфигурируемыми ячейками памяти [5, 6].

### «Грин»–система логического управления

Предлагается разработать микропрограммно–аппаратные вычислители логических функций для энергосберегающих систем логического управления (в дальнейшем такие системы будут именоваться «Грин»–системами), не требующих высокой скорости вычислений и работающих в двух режимах («спящем», «дежурном»). Логический элемент строится на основе ДНФ представления логических функций [7], при этом отключаются кластеры остальных логических элементов системы управления, а результаты выдаются только на соответствующие регистры.

Такой вариант логического элемента может также использоваться для повышения отказоустойчивости при отказах с частичным снижением скорости вычислений, например, в случае отказов в блоках программируемых конъюнкций и/или функций, либо в соседних логических элементах.

Для построения «Грин»–системы логического управления с использованием микропрограммно–аппаратного вычисления логических функций можно ввести следующие формальные требования.

При снижении уровня питающего напряжения увеличивается вероятность отказов (сбоев). Для компенсации этого снижения вводится структурная избыточность, которая с одной стороны компенсирует эту вероятность, с другой – увеличивает энергопотребление.

Нахождение оптимального варианта резервирования, например, градиентным методом, учитывает ограничения по времени вычислений с помощью линейки микропрограммно–аппаратных модулей.

Пусть «Грин»–система логического управления включает в свой состав  $n$  подсистем (кластеров) вычисления логических функций.

Известны значения вероятности безотказной (бессбойной) работы (ВБР)  $P_i$  для исходного энергопотребления  $W_i$  (где  $i = 1..n$ ) каждой из подсистем.

Известно, что при снижении энергопотребления  $\Delta W_i$  вероятность  $P_i$  снижается на значение  $\Delta P_i$ . При этом часть функций возможно вычислять на микропрограммно–аппаратном уровне.

Кроме того, известны временные ограничения  $T_{\max}$ . Имеется  $m$  методов повышения вероятности безотказной работы.

Вариант резервирования с использованием микропрограммно - аппаратного вычисления логических функций имеет вид вектора:  $(k_i, \eta); i = 1, n; \eta = 1, m$ .

Две постановки задачи оптимизации структурной схемы надёжности (ССН) «Грин»–системы логического управления выглядят следующим образом:

3) Найти  $(k_i, \eta) : W_c \rightarrow \min$  при  $P_c(t) \geq P_c^{zad}(t), T \leq T_{\max}$  ;

4) Найти  $(k_i, \eta) : P_c(t) \rightarrow \max$  при  $W_c \leq W_c^{zad}, T \leq T_{\max}$  ,

где  $W_c$  – энергопотребление системы,  $P_c(t)$ – вероятность безотказной (бессбойной) работы системы.

## **Заключение**

Итак, роль зеленых вычислений в современном обществе возрастает год от года. Снизить энергопотребление вычислительных систем можно на нескольких уровнях, в том числе и на микропрограммно-аппаратном. Тем не менее, при снижении энергопотребления существенно повышается вероятность сбоев и нарушений в работе системы. Предлагаемая «Грин»-система находит идеальный баланс между энергосбережением и отказоустойчивостью.

## **Список литературы**

1. San Murgesan. Harnessing Green IT: Principles and Practices. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.sis.pitt.edu/~dtipper/2011/GreenPaper.pdf> (дата обращения 12.12.2012).

2. EPA Energy Star Program (2007) EPA Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency Public Law 109-431. [Электронный ресурс] // URL: [http://hightech.lbl.gov/documents/data\\_centers/epa-datacenters.pdf](http://hightech.lbl.gov/documents/data_centers/epa-datacenters.pdf) (дата обращения 12.12.2012)

3. Fox News / Research Reveals Environmental Impact on Google Searches. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.foxnews.com/story/0,2933,479127,00.html> (дата обращения 12.12.2012)

4. Schwarzer et al. E-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use. Environmental Alert Bulletin 2005. UNEP. [Электронный ресурс] // URL: [http://css.snre.umich.edu/css\\_doc/CSS09-07.pdf](http://css.snre.umich.edu/css_doc/CSS09-07.pdf) (дата обращения 12.12.2012)

5. С. Цыбин. Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри. [Электронный ресурс] // URL: [http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010\\_11\\_56.php](http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010_11_56.php) (дата обращения 12.12.2012).

6. 6T SRAM Cell [Электронный ресурс]. // URL: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/entner/node34.html> (дата обращения 12.12.2012).

7. Тюрин С.Ф., Греков А.В. Набатов А.В. Микропрограммно-аппаратное восстановление логики программируемых логических интегральных схем с использованием функционально-полных толерантных элементов Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012, № 1(140). С. 107-112

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ПЕРЕНАЦЕЛИВАНИИ АППАРАТУРЫ ЗОНДИРОВАНИЯ

### Аннотация

Рассматривается задача оптимального управления переориентацией космического аппарата (КА) при перенацеливании аппаратуры зондирования. Предложен метод приближенного решения задачи. Результаты проведенного моделирования показали высокую эффективность этого метода.

### Введение

В настоящее время широкое применение находят системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Получаемая с их помощью информация находит эффективное применение для решения задач в интересах социально-экономического развития территорий [1]. Одной из задач, решаемых при реализации планов зондирования, является задача оптимального управления переориентацией КА ДЗЗ при перенацеливании аппаратуры наблюдения.

### Постановка задачи

Рассматривается вращательное движение КА ДЗЗ вокруг центра масс [2]:

$$\frac{d\sigma}{dt} = N(\sigma)\tilde{\omega}; \quad \frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \mathbf{B}u + \mathbf{f}_\omega \quad (1)$$

где  $\sigma = \text{col}(\vartheta, \gamma, \psi)$  – вектор параметров ориентации КА в орбитальной системе координат,  $\vartheta$  – угол тангажа,  $\gamma$  – угол крена и  $\psi$  – угол рысканья;  $\tilde{\omega} = \text{col}(\tilde{\omega}_x, \tilde{\omega}_y, \tilde{\omega}_z)$  – вектор угловой скорости КА в ОСК, которая вращается с угловой скоростью  $\omega_{\text{ОСК}}(t)$  ( $\omega = \tilde{\omega} + \omega_{\text{ОСК}}$  – вектор абсолютной угловой скорости КА);  $u = \text{col}(u_x, u_y, u_z)$  – вектор управляющих параметров,  $B = \text{diag}(b_x, b_y, b_z)$ ,  $b_k = a_k / J_k$ ,  $k = x, y, z$  ( $J_k$ ,  $k = x, y, z$ , – главные центральные моменты инерции КА,  $a_k$ ,  $k = x, y, z$ , – некоторые заданные коэффициенты);  $f_\omega = f_\omega(t, \sigma, \tilde{\omega})$  – вектор-функция, определяемая гироскопическим и иными возмущающими моментами. Соответственно, для выбранных параметров ориентации

$$N(\sigma) = \begin{bmatrix} -\frac{\sin \psi}{\cos \gamma} & 0 & \frac{\cos \psi}{\cos \gamma} \\ \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ \frac{\sin \psi \sin \gamma}{\cos \gamma} & 1 & -\frac{\cos \psi \sin \gamma}{\cos \gamma} \end{bmatrix}.$$

Маневр перенацеливания на интервале управления  $[t_0, t_f]$  задается граничными условиями:

$$\sigma(t_0) = \sigma_0; \quad \sigma(t_f) = \sigma_f; \quad \tilde{\omega}(t_0) = \tilde{\omega}_0; \quad \tilde{\omega}(t_f) = \tilde{\omega}_f, \quad (2)$$

где  $\sigma_0, \sigma_f, \tilde{\omega}_0, \tilde{\omega}_f$  – заданные векторные константы.

### Алгоритм решения задачи

По определению [4]:

$$\frac{d\pi}{dt} = \tilde{\omega}, \quad (3)$$

где  $\pi = \text{col}(\pi_x, \pi_y, \pi_z)$  – вектор квазиординат, связанных с параметрами ори-

ентации КА следующим образом:  $\frac{d\sigma}{dt} = N(\sigma) \frac{d\pi}{dt}$ . Соответственно, первое

уравнение в (1) можно заменить кинематическим соотношением (3). С учетом этой замены уравнения углового движения КА (1) приводятся к виду [2]

$$\frac{d\pi}{dt} = \tilde{\omega}; \quad \frac{d\tilde{\omega}}{dt} = Bu + f_\omega \quad (4)$$

и к замене граничных условий (2) следующими условиями:

$$\pi(t_0) = 0; \quad \pi(t_f) = \pi_f, \quad (5)$$

где  $\pi_f$  – вектор их значений в конечный момент времени. Если в (4) предположить, что  $f_\omega$  – известная на интервале управления  $[t_0, t_f]$  вектор-функция времени, то эту систему можно рассматривать как линейную управляемую систему. Для нее можно сформулировать двухточечную граничную задачу: найти такое допустимое управление  $u(\cdot) \in L_q$ , что для него на решениях системы (4) удовлетворяются граничные условия (5).

В задачах оптимального управления переориентацией КА обычно требуется минимизировать функционалы, например, типа нормы в функциональных пространствах  $L_q[t_0, t_f]$ ,  $1 \leq q \leq \infty$  [3]:

$$J(u(\cdot)) = \|u(\cdot)\|_{L_q}^{(v)} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $\|u(\cdot)\|_{L_q}^{(v)} = \left( \int_{t_0}^{t_f} \|u(\tau)\|_v^q d\tau \right)^{\frac{1}{q}}$  при  $1 \leq q < \infty$ ,  $\|u(\tau)\|_v$  – гельдеровская норма для вектора  $u(\tau)$  ( $\forall \tau \in [t_0, t_f]$ ,  $1 \leq v \leq \infty$ ); если  $q = \infty$ , то в (6)

$\|u(\cdot)\|_{L_\infty}^{(v)} = \text{vrai max}_{\tau \in [t_0, t_f]} \|u(\tau)\|_v$ . Различные сочетания  $q$  и  $v$  в (6) приводят к раз-

ным по содержанию постановкам задач оптимального управления для (1) или (4). Как известно, они эффективно решаются сведением к оптимальной проблеме моментов. Например, если можно было бы указать значение  $\pi_f$  в (5), исходя из (2), то сразу же можно было бы получить оптимальное управление для задачи (4) – (6) [2]:

$$u^*(t) = u^*(t; c_\pi, c_\omega, \pi_f), \quad \forall t \in [t_0, t_f], \quad (7)$$

где  $c_\pi = \pi_f - T_\Pi \tilde{\omega}_0 - g_{1f}$  ( $T_\Pi = t_f - t_0$ ),  $c_\omega = \tilde{\omega}_f - \tilde{\omega}_0 - g_{2f}$ , а  $g_{1f} = g_1(t_f)$ ,  $g_{2f} = g_2(t_f)$ . Вектор-функции  $g_1(t)$  и  $g_2(t)$  суть решения начальной задачи

$$\frac{dg_1}{dt} = g_2; \quad \frac{dg_2}{dt} = \tilde{f}_\omega(t); \quad g_1(t_0) = 0; \quad g_2(t_0) = 0, \quad (8)$$

где  $\tilde{f}_\omega(t) = f_\omega(t, \sigma(t), \tilde{\omega}(t))$ , а  $\sigma(t)$  и  $\tilde{\omega}(t)$  – решения системы (4), с учетом программы (7).

При замене задачи управления (1), (2), (6) задачей (4) – (6) для заданных условий (5), вообще говоря, заранее нельзя указать значение  $\pi_f$ , исключая случай  $N(\sigma) \cong \text{diag}\{1, 1, 1\}$ , когда  $\pi_f \cong \sigma_f - \sigma_0$ . Однако, введение вектор-функции  $\tilde{f}_\omega(t)$  приводит к «линеаризации» системы (1) и возможности синтеза (7) методом моментов. Принимая вначале в (1)  $\tilde{f}_\omega(t) \equiv 0$ , можно найти подходящее, в смысле требуемой точности, такое значение  $\pi_f = \pi_f^{(0)}$ , что решение для следующей системы, получаемое с учетом (7) и соответствующих начальных условий:

$$\frac{d\pi^{(0)}}{dt} = \tilde{\omega}^{(0)}; \quad \frac{d\tilde{\omega}^{(0)}}{dt} = u^{(0)}(t) = u^*(t; c_\pi^{(0)}, c_\omega^{(0)}, \pi_f^{(0)}); \quad \frac{d\sigma^{(0)}}{dt} = N(\sigma^{(0)})\tilde{\omega}^{(0)},$$

будет удовлетворять конечным условиям (2), (5). Очевидно, что в этом случае решение системы (8) будет тождественно нулевым. Полученные таким образом вектор-функции  $\pi^{(0)}(t)$ ,  $\tilde{\omega}^{(0)}(t)$ , а также  $\sigma^{(0)}(t)$  вместе с  $\tilde{f}_\omega^{(0)}(t) = f_\omega(t, \sigma^{(0)}(t), \tilde{\omega}^{(0)}(t))$  можно рассматривать в качестве начального (нулевого) приближения для решения задачи (4) – (6). Переходя далее к отысканию последующих приближений для решения этой задачи, следует учитывать наличие поправок  $g_{1f}^{(k-1)}$ ,  $g_{2f}^{(k-1)}$ ,  $k=1,2,3,\dots$ , получаемых при решении системы (8) с  $\tilde{f}_\omega^{(k-1)}(t) = f_\omega(t, \sigma^{(k-1)}(t), \tilde{\omega}^{(k-1)}(t))$ ; очевидно, что при  $k=1$   $g_{1f}^{(0)} \neq 0$  и  $g_{2f}^{(0)} \neq 0$ . Построение  $k$ -го приближения сводится к отысканию такого  $\pi_f = \pi_f^{(k)}$  и соответствующего ему решения системы

$$\frac{d\pi^{(k)}}{dt} = \tilde{\omega}^{(k)}; \quad \frac{d\tilde{\omega}^{(k)}}{dt} = u^{(k)}(t) + \tilde{f}_\omega^{(k-1)}(t), \quad (9)$$

где  $u^{(k)}(t) = u^*(t; c_\pi^{(k)}, c_\omega^{(k)}, \pi_f^{(k)})$  – оптимальное управление для системы (4), вычисляемое при  $c_\pi^{(k)} = \pi_f^{(k)} - T_\Pi \tilde{\omega}_0 - g_{1f}^{(k-1)}$ ,  $c_\omega^{(k)} = \tilde{\omega}_f - \tilde{\omega}_0 - g_{2f}^{(k-1)}$ , где  $g_{1f}^{(k-1)} = g_1^{(k-1)}(t_f)$ ,  $g_{2f}^{(k-1)} = g_2^{(k-1)}(t_f)$  – поправки, получаемые при решении системы (8) с вектор-функцией  $\tilde{f}_\omega^{(k-1)}(t)$ . При определении  $\pi_f = \pi_f^{(k)}$  (например, методом градиентного спуска) вместе с (9) необходимо также решать уравнение

$$\frac{d\sigma^{(k)}}{dt} = N(\sigma^{(k)})\tilde{\omega}^{(k)}, \quad \sigma^{(k)}(t_f) = \sigma_f \quad (10)$$

с целью проверки (на каждом шаге градиентного спуска) выполнения условия  $\|\sigma^{(k)}(t_f) - \sigma_f\| \leq \varepsilon$  ( $\varepsilon$  – требуемая точность) и, при его выполнении, последующего вычисления вектор-функции  $\tilde{f}_\omega^{(k)}(t)$ , необходимого для построения следующего, то есть  $k+1$ -го приближения решаемой задачи. При  $k \rightarrow \infty$  для последовательных приближений (8), (9) имеет место:

$$\pi_f^{(k)} \rightarrow \pi_f^*; \quad g_{1f}^{(k)} \rightarrow g_{1f}^*; \quad \tilde{g}_{2f}^{(k)} \rightarrow g_{2f}^*,$$

где  $g_{1f}^*, g_{2f}^*$  такие, что  $c_\pi^* = \pi_f^* - T_n \tilde{\omega}_0 - g_{1f}^*$ ,  $c_\omega^* = \tilde{\omega}_f - \tilde{\omega}_0 - g_{2f}^*$ , а  $u^*(t) = u^*(t; c_\pi^*, c_\omega^*, \pi_f^*)$  – оптимальная программа управления (7) для задачи (1), (2), (6).

По результатам математического моделирования маневров переориентации применительно к параметрам КА «Ресурс-ДК» и для значений показателя  $q = 2, \infty$  в (6) была установлена высокая скорость сходимости рассмотренного процесса синтеза оптимального управления, а именно, с точностью  $\varepsilon$  до десятка угловых секунд требовалось до 2...5 последовательных приближений.

### Заключение

Рассмотрена задача оптимального управления переориентацией космического аппарата при перенацеливании аппаратуры зондирования. Предложен вычислительный алгоритм приближенного решения задачи. Результаты проведенного моделирования показали высокую эффективность этого алгоритма. В связи с этим он может быть использован в бортовой вычислительной системе КА дистанционного зондирования Земли при формировании программы оптимального управления его переориентацией при перенацеливании аппаратуры наблюдения.

### Список литературы

1. Горелов Ю.Н., Курганская Л.В., Морозова М.В., Данилов С.Б. Оптимальное планирование процессов дистанционного зондирования Земли из космоса // Сб. тр. XIX С.-Петербургской междунар. конф. по интегрированным системам. СПб, 2012. С. 252-258.
2. Горелов Ю.Н., Данилов С.Б., Тропкина Е.А. Об одном подходе к приближенному решению задачи оптимального управления переориентацией космического аппарата // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2011, т.18, в.3. С.429-431.
3. Красовский Н.Н. Теория управления движением: линейные системы. М.: Наука, 1965. 476 с.
4. Маркеев А.П. Теоретическая механика. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и стохастическая динамика», 2007. 592 с.

## **СРЕДСТВА АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ**

### **Аннотация**

Работа посвящена обзору основных вех развития систем активной безопасности автомобилей, представлена характеристика аварийных ситуаций на дороге. Рассматриваются новые системы помощи водителю в сложных условиях вождения.

### **Введение**

Проблема безопасности движения автомобильного транспорта является одной из острейших глобальных проблем современного общества и затрагивает интересы практически всех жителей нашей планеты.

Ключом к пониманию проблемы и определению наиболее эффективных способов ее решения является системный анализ условий столкновений объекта с препятствиями.

Анализ условий столкновений показывает, что в общем случае задача предотвращения столкновений является алгоритмически неразрешимой [1]. В обыденном смысле это означает, что неукоснительное соблюдение правил дорожного движения водителем и полная исправность его автомобиля не являются гарантией безопасности на дороге. Достаточным условием предотвращения столкновений является соблюдение правил движения и техническая исправность транспортных средств всех участников движения.

Множество типовых столкновений, обусловленных ошибками управления и техническими неисправностями управляемого автомобиля строиться в пространстве дискретных переменных: скорости препятствия, ускорения управляемого объекта и непрогнозируемого изменения направления движения управляемого объекта.

Анализ множества типовых столкновений показывает, что наиболее перспективным направлением решения проблемы, развиваемым ведущими фирмами - производителями автомобилей, является создание различных систем активной безопасности [2] и оснащение ими всего автомобильного парка. Перспективность полнофункциональных систем активной безопасности объясняется тем, что их применение потенциально позволяет предотвратить все 100 типовых столкновений из 100 возможных [1], в то время как строительство дорог магистрального типа позволяет предотвратить лишь 60 из 100 типовых столкновений.

Так же нельзя не отметить опасность, которую представляют транспортные средства для пешеходов. Вероятность летального исхода значительно возрастает при увеличении скорости автомобиля с 35 до 50 км/ч.

При оценивании результата дорожных происшествий особое внимание всегда уделяют скорости автомобиля. Согласно Национальной ассоциации для

Поощрения Безопасности дорожного движения [3], сокращение средней скорости на сельских шоссе с 10 % могло фактически сократить количество несчастных случаев с 20 %. То же самое сокращение скорости могло также привести к сокращению телесных повреждений с 30% и число аварий почти с 40 %.

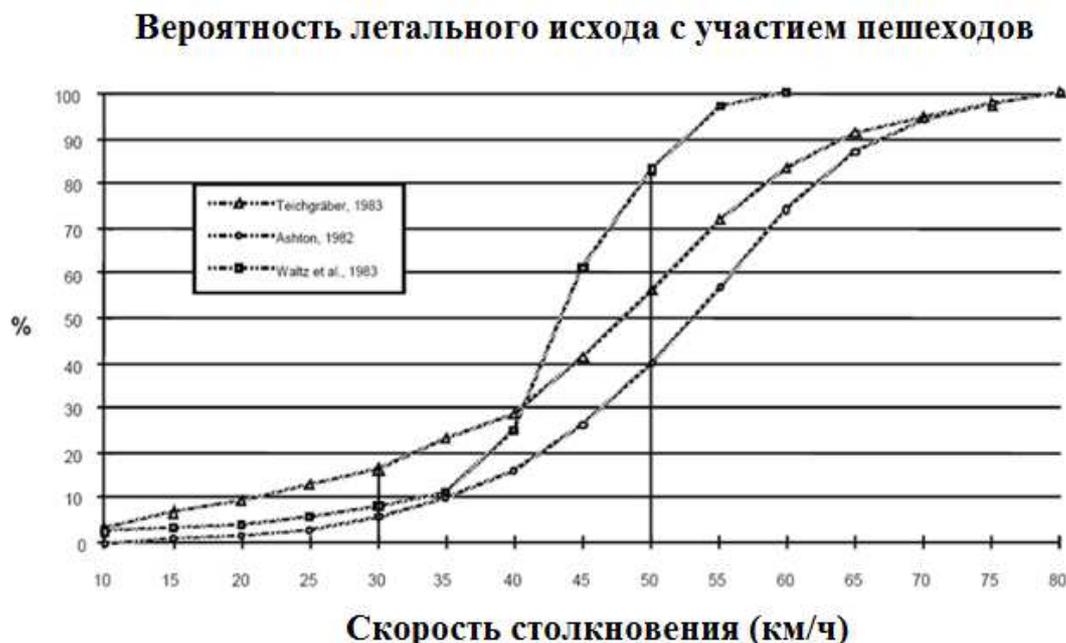


Рис. 1. Летальность столкновения в зависимости от скорости автомобиля

Общая структура электронных систем поддержки управления, в которую входят как средства активной безопасности, так и пассивной представлена [4] на рис. 2.



Рис. 2. Структура электронных систем поддержки управления

## Основные вехи развития средств активной безопасности

### АБС (Антиблокировочная тормозная система, 1978)

АБС препятствует заносу колес, и способствует управляемости транспортного средства во время резкого торможения. Во время плохих дорожных условий, АБС также уменьшит тормозной путь. Система измеряет скорость всех четырех колес, и если один из датчиков сообщает о неправильном замедлении (превышающий заданное значение), то давление в тормозной системе и воздействию на это колесо будет уменьшено. Немецкая компания *Bosch*, производитель автомобильного оборудования имеет патент «механизма предотвращающего занос колес автомашины» с 1936. Первый опытный образец АБС был проверен в 1970, но надежность электроники была слишком низкой, из-за чего первое внедрение системы в серийные автомобили произошло лишь в 1978.

### Регулирование тяги (1985)

Функционирование системы регулирования тягового усилия во многом похоже на работу АСБ. Система препятствует прокручиванию колёс во время ускорения. Обычно используются те же датчики скорости вращения колес, как и в АБС. Если сцепление транспортного средства с дорогой уменьшается и колёса начинают проскальзывать, то формируется команда уменьшения тяги двигателя, что улучшает управление транспортным средством. Первая система управления тягой была разработана в 1985 и внедрена компанией *Bosch*.

### Контроль устойчивости (1995)

В очередной раз компания *Bosch* была первой, кому удалось внедрить систему контроля устойчивости *ESP (Electronic Stability Program)* в 1995. Существуют различные варианты исполнения, но основанная задача системы контроля устойчивости заключается в измерении уровня рыскания транспортного средства, то есть в сравнении текущей траектории с заданной. Если отклонение превышает порог срабатывания, то ESP активизирует тормоза на соответствующих колёсах, для возвращения на заданную траекторию.

### Адаптивный Круиз-контроль (1998)

Тойота в мае 1998 стала первой машиной, на которой была установлена система Адаптивного Круиз-контроля (АКК). АКК использует радар или лазер, чтобы контролировать расстояние до расположенных впереди транспортных средств. Расстояние до впереди идущего будет автоматически поддерживать торможением. Обычно автомобили с АКК оснащаются системой определения фронтальных столкновений. В Европе, введены регламенты устанавливающий

максимальный порог торможения равный  $3.0-3.5 \frac{M}{c^2}$ . Если транспортное средство обнаруживает, что требуется более интенсивное торможения для предотвращения столкновения, то АКК подаёт водителю звуковой сигнал.

### Система предотвращения лобовых столкновений (2003)

Система предназначена для предотвращения и уменьшения последствий лобовых столкновений. Используются радары аналогичные АКК, позволяющие контролировать расстояние до впереди идущего транспортного средства, в случае если расстояние начнёт уменьшаться, а скорость автомобиля будет неиз-

менно, то торможение начнётся автоматически, а водитель будет предупреждён звуковым сигналом. Принцип работы основан на использовании уровней предупреждения.

Система *Collision Mitigation System (CMS)*, например, использует следующую технику:

1. Основное предупреждение, Когда возникает риск столкновения с впереди идущим транспортным средством и расстояние между транспортными средствами становится не соответствующим скорости, звучит сигнал тревога и сообщение «ТОРМОЖЕНИЕ» информирует водителя на приборной панели, побуждая водителя предпринять профилактические меры.

2. Вторичное предупреждение, Если расстояние между этими двумя транспортными средствами продолжает уменьшаться, применяется легкое торможение, ремни безопасности мягко воздействуют на водителя два раза, давая осязаемое предупреждение.

3. Сокращение повреждения столкновения, Если система решает, что столкновение неизбежно, предварительные натяжные приспособления ремня безопасности активизированы с достаточным количеством силы, чтобы выбрать излишек. Так же применяется экстренно торможение с усилием приблизительно равным  $6 \frac{i}{\ddot{y}^2}$  чтобы далее уменьшить скорость столкновения.

#### Система удержания полосы (2003)

Система удержания полосы помогает водителю находиться в центре выбранного ряда на дороге. Как правило, используют акустический сигнал оповещения или рулевое колесо, чтобы привести в готовность водителя, если транспортное средство приближается к маркировкам разметки. Возможно информирования водителя о приближении к пешеходным переходам и другим важным элементам дорожной инфраструктуры.

#### Контроль слепых зон (2005)

Главная идея системы контроля слепых зон, дать водителю общее представление о ситуации позади автомобиля и понизить риск неправильного изменения полосы, предупреждая об опасности подобного манёвра.

Есть различные методы для того, чтобы достигнуть этой цели, но обычно используется система технического зрения или радар. О системах оповещения слепых зон объявляли многие автопроизводителями, но только в 2005, Вольво выпустила Информационную систему контроля слепых зон (*BLIS*)

### **Основные виды аварийных ситуаций**

Можно выделить основные причины дорожных происшествий, и краткая классификация представлена ниже:

1. Уход с полосы
  - 1.1 Съезд с дороги
  - 1.2 Выезд на встречную полосу
  - 1.3 Столкновение с дорожной инфраструктурой
2. Столкновение с объектом в одной полосе

- 2.1 Транспортное средство
- 2.2 Препятствие
- 3. Столкновения при смене полосы
  - 3.1 Столкновение с автомобилем из слепой зоны
  - 3.2 Неправильный выбор скоростного режима при перестроении
  - 3.3 Неправильный выбор скоростного режима при перестроении
- 4. Потеря управления
  - 4.1 Потеря сцепления
  - 4.2 Быстрый вход в поворот
  - 4.3 Потеря сцепления из-за погодных условий
- 5. Аварии на перекрёстке
  - 5.1 Выезд за стоп линию
  - 5.2 Столкновения на перекрёстке
- 6. Ошибка выбора полосы при двухстороннем движении
- 7. Столкновения связанные с парковкой
  - 7.1 Выезд с парковки
  - 7.2 Парковка
- 8. Столкновения с объектами в полосе
  - 8.1 Животные
  - 8.2 Пешеходы
  - 8.3 Велосипедисты

### **Перспективные системы автомобильной безопасности**

Краткий обзор перспективных систем поддержки водителя:

Система поддержки движения в полосе (*Lane Keeping Aid*) Использование машинного зрения для контроля линий разметки и поддержание движения в заданной полосе.

Система поддержки при перестроении (*Lane Change Aid*) Позволяет безопасно перестраиваться, информируя водителя сигналом в случае присутствия в слепых зонах других транспортных средств.

Предотвращения столкновений торможением (*Collision Mitigation by Braking*) Автоматическое торможение в случае возможного столкновения, возможное расширение функционала за счёт контроля качества дорожного покрытия для более раннего торможения в случае обледенения. Возможное определение опасных водителей.

Предупреждение о повороте (*Curvature Warning*) Сигнал опасности активируется если водитель слишком быстро приближается к повороту или входит в него на скорости, превышающую критическую.

Предупреждение о перекрётках (*GiveWayWarning*) Информирование звуковым и световым сигналом водителя при подъезде к стоп-линии.

Радар препятствий (*Wildlife scanner, Pedestrian & Bicycle scanner*) Сканирование пространства перед автомобилем, в случае детектирование препятствия автоматическое торможение.

Автоматическое маневрирование (*True Collision Avoidance by Steering True CAbS*) Система позволяющая в случае возникновении аварийных ситуаций

не только тормозить, но и покидать полосу в которой возникает подобная ситуация, работает вместе с системой поддержки при перестроении.

### **Заключение**

Системы поддержки управления движением существуют в каждой новой машине, большое разнообразие, как систем, так и производителей бортовой электроники указывает перспективность этого. Безопасность движения зависит от согласованной и безотказной работы всех элементов автомобильной автоматики. Дальнейшее развитие и интеграция систем приведёт в скором будущем к появлению автомобильных автопилотов.

### **Список литературы**

1. Бузников С.Е. Принципы построения рекордных автомобильных систем активной безопасности. Труды XIV Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2006. – С. 506 –507.

2. Системный анализ дорожного движения и дорожно - транспортных происшествий : Сб . науч . тр ./ МАДИ ; редкол : В. А. Иларионов ( отв . ред . ) и др., - М.: МАДИ . 1989. – 107 с .

3. Traffic Safety Facts 2004 Data, Department of Transportation HS 809 911, NHTSA's National Center for Statistics and Analysis, [www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-30/ncsa/TSF2004/809911.pdf](http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-30/ncsa/TSF2004/809911.pdf)

4. Кравотта, Р. Электронный разум делает автомобиль безопасным / Р. Кравотта // Chip News/Инженерная микроэлектроника. - 2007. - N 1. - . 27-30

УДК 621.865.8:681.5

Р.А. Мунасыпов, Т.Р. Шахмаметьев, И.С. Ахметзянов, И.Х. Хамадеев  
*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

## **ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

### **Аннотация**

В данной статье рассмотрены основные локомоции движения реконфигурируемого мобильного робота и их особенности, а также рассмотрены задачи и структура управления, сформированные с учетом особенностей этих основных локомоций.

### **Введение**

Реконфигурируемые мобильные роботы это автономные машины с кинематической переменной морфологией. В отличие от роботов с фиксированной морфологией, реконфигурируемые мобильные роботы могут изменять свою форму, при этом перенастраивая систему управления и перестраивая связи ме-

жду механическими частями, с целью адаптации к новым условиям внешней среды, при выполнении новых задач или при восстановлении от повреждений. Робот такого вида, к примеру, способен собраться в змееобразную форму, для того, чтобы перемещаться через узкую трубку или собраться в паукообразную конфигурацию, чтобы передвигаться по пересеченной местности или преобразоваться в произвольный объект, например, шар или колесо, чтобы быстро перемещаться на ровной местности.

На кафедре Технической кибернетики сконструирован реконфигурируемый мобильный робот (рис. 1). Данный робот предназначен для зондирования труднодоступных или опасных для человека местностей, также его можно использовать как исследовательский стенд для разработки и отладки алгоритмов управления различными видами ползающих и шагающих движений.



*Рис. 1. Реконфигурируемый мобильный робот «Легион»*

### **Виды локомоций движений 1**

Рассмотрим три типа локомоций движений: шагающую; ползающую; катящуюся (т.е. робот собирается в виде колеса или шара). Все четвероногие животные при движении сохраняют равновесие почти исключительно за счет динамической устойчивости, однако в случае искусственных шагающих аппаратов походка может быть определена таким образом, чтобы центр тяжести робота постоянно находился внутри треугольника (рис. 2), вершинами которого являются конечности, находящиеся на данный момент времени в опорном положении [1].

С увеличением числа ног шагающих машин проблема их структуры управления упрощается, но с другой стороны, вследствие возросшего числа опор их механическая часть становится несколько более сложной. Следующей машиной с большим числом статически устойчивых конфигураций является шестиногая машина. В качестве одного из возможных типов походок можно принять схему 3-3 т.е. 3 ноги будут находиться в опорном положении, а остальные 3 ноги в состоянии переноса.

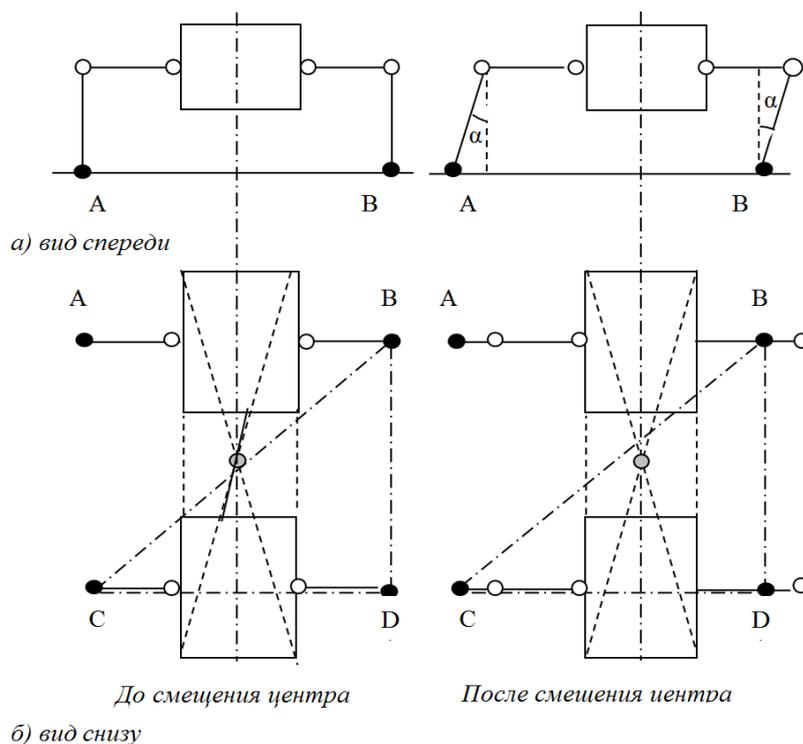


Рис. 2. Стабилизация положение корпусов модулей четырех ног конфигурации

В схеме 3-3 центр тяжести аппарата постоянно находится внутри многоугольника, что дает устойчивость без дополнительных движений корпуса. При увеличении ног на четное количество, схема походки будет иметь следующий вид  $K/2—K/2$ , где  $K$  - общее количество ног [2].

Перемещение конфигурации «Змея» осуществляется за счет создания бегущих пространственных волн деформации общего корпуса. Для реализации бегущей волны заданием мгновенной формы необходимо обеспечить одновременную отработку заданных углов всеми модулями. Скорость и плавность движения волны вдоль цепи соединенных модулей зависит от скорости формирования межмодульных углов для каждого модуля [3].

Теперь рассмотрим конфигурацию колесо. Этот тип локомоции можно использовать на относительной ровной местности с минимальным количеством препятствий. Этот тип колесной системы традиционно доминируют с точки зрения эффективности передвижения по сравнению с другими. Колесные тип передвижения энергоэффективны и позволяют передвигаться с высокой скоростью. Однако проходимость препятствий ограничено размерами колеса, а увеличение размера колеса приводит другим нежелательным особенностям.

Реконфигурируемый мобильный робот катится по горизонтальной плоскости, перемещая свои модули по окружности, а, следовательно, и всего себя, изменяя свою форму. На рис. 3 показана последовательность движений и реализации динамического контроля на каждом этапе. Существуют два режима для передвижения шестимодульного колеса, первый - замещения правильного шестиугольника (показано на диаграмме слева) на деформированный шестиугольник,

который имеет тенденцию к падению вперед (показано посередине диаграммы), второй – обратное замещение шестиугольников.

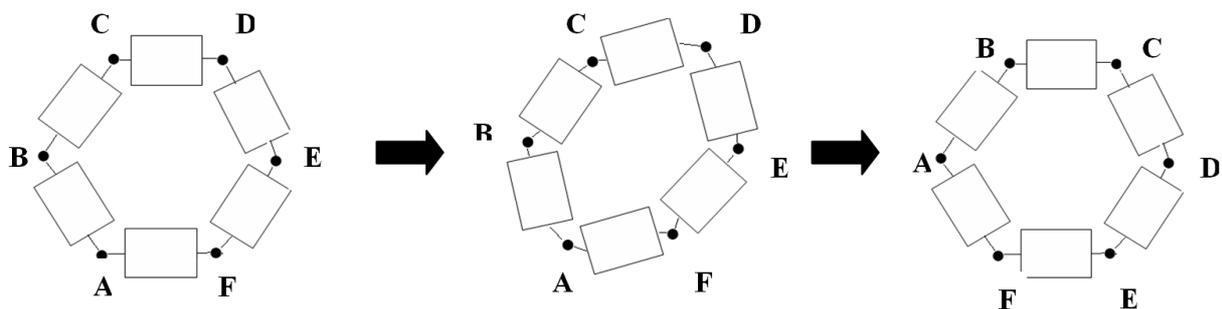


Рис. 3. Способ перемещения конфигурации «шестимодульное колесо»

Стартовая фигура – правильный шестиугольник, движение происходит при формировании деформации формы правильного шестиугольника вследствие чего, смещается центр тяжести робота. Деформированная форма переносит центр тяжести, вперед, создавая при этом крутящий момент. Быстрое движение достигается за счет активной смены этих двух форм. Акселерометр установлен в каждом модуле, благодаря чему, каждый модуль знает, вектор гравитации в отношении своих собственных координат.

### Задачи и структура системы управления 2

Задача системы управления шагающей конфигурацией схожа с ползающей конфигурацией и с конфигурацией «шестимодульного колеса», и в неё входят:

- стабилизация в процессе движения положения корпуса робота в пространстве;
- обеспечение движения по определенному маршруту с обходом препятствий;
- связанное управление ногами и позвонками, реализующее определенный тип (походка) и способ движения с адаптацией к рельефу местности.

Таким образом, система управления реконфигурируемого мобильного робота должна быть гибкой и должна удовлетворять требованиям всех возможных конфигураций.

Для решения вышеуказанных задач предлагается структура системы управления реконфигурируемым мобильным роботом, которая содержит следующие 4 уровня управления:

- первый, нижний, уровень – управление приводами степеней подвижности ног и позвонков;
- второй уровень – построение способа движения, т.е. координации движений ног и/или позвонков, со стабилизацией при этом положения корпуса робота в пространстве;

- третий уровень – формирование типа движения, направления и скорости движения, исходя из заданного маршрута в целом и синхронизации моделей;
- четвертый уровень – предполагает выработку алгоритмов управления и планирования без активного участия человека.

### **Заключение**

Рассмотрены особенности локомоций движения основных конфигураций реконфигурируемого мобильного робота, а также задачи и структура системы управления будут использованы для дальнейшего исследования и построения системы управления.

### **Список литературы**

1. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. М, «Мир», 1976. 543 с. / Под ред. В. С. Гурфинкеля.
2. Шахмаметьев Т. Р. Принципы построения системы управления реконфигурируемого мобильного робота // Актуальные проблемы науки и техники. 2011. Том 4. С. 348-351.
3. А.А. Иванов, А.В. Рогов, Н.С. Телешев. Виртуальный прототип и физический макет змеевидного робота // Актуальные проблемы защиты и безопасности : Труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции. Т. 5. Экстремальная робототехника. НПО СМ, СПб, – 2005. – С. 116-121.

УДК 629.7.015

Ш.Х. Муратов, В.М. Деваев

*Казанский национальный исследовательский университет им. А.Н. Туполева – КИИ, Казань*

## **ЗАДАЧА ТОЧНОЙ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ УПРАВЛЯЕМЫМ ПАРАШЮТОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

### **Аннотация**

Рассматривается задача точной доставки грузов на площадку ограниченных размеров с помощью управляемого парашюта. Задача решается в условиях переменного ветра, вектор скорости ветра лежит в плоскости земли. Известен диапазон изменения величины и направления ветра. Управление парашютом автоматическое, осуществляется с помощью рулевых машинок, обеспечивающих дифференциальный подтяг строп управления.

Управление формируется на основе навигации с помощью бортовой системы ГЛОНАСС, датчиков магнитного курса, барометрического высотомера. Определяется пространственная конфигурация области начальных условий, из которой при заданных ветровых условиях и алгоритмах управления обеспечиваются необходимые условия посадки в круг заданного радиуса.

## Управление в условиях неопределенности

Постановка задачи. Рассматривается многокритериальная задача управления техническим объектом при наличии неопределенных возмущений. Получены необходимые условия гарантированного обеспечения нормального функционирования объекта на заданных множествах управляющих и возмущающих воздействий.

На первом этапе проектирования системы управления, когда её структура и параметры неизвестны, необходимо оценить, достаточно ли множество допустимых управляющих воздействий для обеспечения нормального функционирования объекта управления на заданном множестве возмущений.

Для решения этой задачи используем подход основной задачи управления в постановке, приведенной в работе [1]. Пусть качество функционирования некоторого управляемого технического объекта характеризуется набором показателей-функционалов  $I_i(W, U)$ ,  $i = \overline{1, m}$  определенных на множестве возмущающих  $W = (w_1, w_2, \dots, w_g)$  и управляющих воздействий  $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  из некоторых функциональных пространств.

Компоненты вектора  $W$  имеют неопределенный характер изменения в пределах заданного множества  $\Omega_w$  функционального пространства возмущающих воздействий:  $W \in \Omega_w$ .

Известно множество  $\Omega_u$  допустимых значений вектор-функции управляющих воздействий:

$$U \in \Omega_u. \quad (1)$$

Нормальное функционирование объекта гарантируется, если при любых  $W \in \Omega_w$  все показатели-функционалы удовлетворяют следующим ограничениям:

$$I_{1i} \leq I_i \leq I_{2i}, i = \overline{1, m} \quad (2)$$

Где  $I_{1i}$  и  $I_{2i}$  - заданные границы изменения показателей качества. Для решения задачи управления используется подход, приведенный в публикации [2].

При заданной вектор-функции управляющего воздействия  $U^*$  в силу неопределенности возмущающего воздействия, каждый функционал  $I_i (i = \overline{1, m})$  принимает некоторое значение из интервала  $[I_i^I, I_i^{II}]$ :

$$\begin{aligned} I_i^I &= \min_{W \in \Omega_w} I_i(W, U^*), \\ I_i^{II} &= \max_{W \in \Omega_w} I_i(W, U^*), \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (3)$$

Противодействуя возмущениям с помощью управляющего воздействия  $U \in \Omega_u$ , можно сузить интервалы неопределенности функционалов до следующих предельных значений:

$$\begin{aligned} I_i^{(1)} &= \max_{U \in \Omega_u} I_i^I = \max_{U \in \Omega_u} \min_{W \in \Omega_w} I_i(W, U); \\ I_i^{(2)} &= \min_{U \in \Omega_u} I_i^{II} = \min_{U \in \Omega_u} \max_{W \in \Omega_w} I_i(W, U), \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (4)$$

По соотношениям предельных значений функционалов  $I_i^{(1)}$ ,  $I_i^{(2)}$  и ограничениям на функционалы (2), делается заключение о возможности гарантированного обеспечения нормального функционирования объекта.

Теорема. Для гарантированного обеспечения нормального функционирования объекта, которое характеризуется выполнением требований (3) в условиях неопределенности возмущающих воздействий (I) на заданном множестве допустимых управляющих воздействий (2), необходимо выполнение следующих условий:

$$\begin{aligned} \max_{U \in \Omega_u} \min_{W \in \Omega_w} I_i &\geq I_{1i}; \\ \min_{U \in \Omega_u} \max_{W \in \Omega_w} I_i &\leq I_{2i}, i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (5)$$

Доказательство приведено в работе [2].

Лемма. Чтобы при любом возмущающем воздействии (I) для каждого значения функционала  $I_i^*$  из некоторого интервала  $[\underline{I}_i, \overline{I}_i]$  существовало управление  $U$ , принадлежащее множеству допустимых управляющих воздействий (2) и обеспечивающее значение функционала  $I_i(W, U) = I_i^*$ , необходимо выполнить следующие условия:

$$\begin{aligned} \max_{U \in \Omega_u} \min_{W \in \Omega_w} I_i &\geq \overline{I}_i; \\ \min_{U \in \Omega_u} \max_{W \in \Omega_w} I_i &\leq \underline{I}_i. \end{aligned} \quad (6)$$

Доказательство приведено в работе [2].

### Задача управления парашютом в условиях неопределенного ветра

Рассмотрим кинематическую модель движения парашюта, приведенную в [3]. В любой момент времени, его скорость относительно земной системы координат определяется как вектор, представляющий из себя сумму вектора скорости воздушной среды и скорости ветра. Горизонтальная и вертикальная составляющие скорости парашюта относительно воздушной среды определяются аэродинамическими характеристиками парашюта, весом груза и управляющими воздействиями. Управляющие воздействия представляют собой величины подтяга правой и левой строп. Одновременное подтягивание строп меняет величины  $V_{гор}$ ,  $V_{вер}$ . Разница подтягивания строп определяет скорость разворота парашюта относительно вертикальной оси.

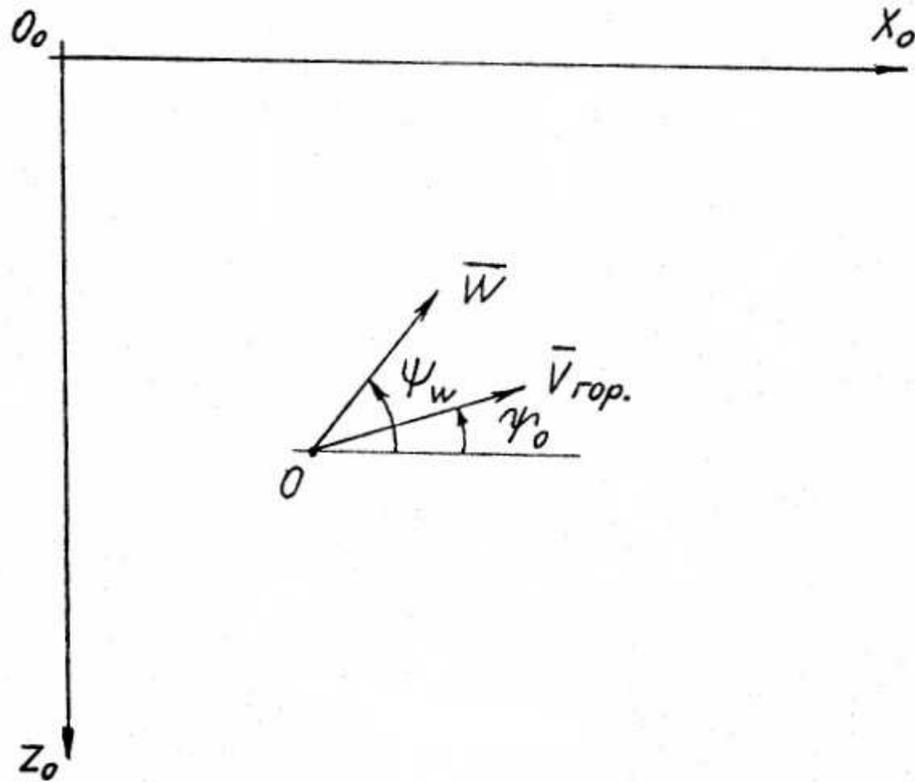


Рис 1

Вектор средней скорости ветра параллелен плоскости Земли. Кинематические уравнения движения имеют следующий вид:

$$\frac{dx_0}{dt} = V_{гор} \cos \psi_0 + W \cos \psi_w, \quad (7)$$

$$\frac{dy_0}{dt} = V_{вер}, \quad (8)$$

$$\frac{dz_0}{dt} = -V_{гор} \sin \psi_0 - W \sin \psi_w \quad (9)$$

$$\frac{d\psi_0}{dt} = \omega, \quad (10)$$

где  $x_0, y_0, z_0$  - координаты центра масс системы ПК – груз в земной системе координат  $O_0, X_0, Y_0, Z_0$ .

$V_{гор}, V_{вер}$  – величины горизонтальной и вертикальной составляющих скорости центра масс относительно воздушной среды.

$W$  - средняя скорость ветра.

$\psi_0, \psi_w$  - углы, определяющие ориентацию горизонтальной составляющей скорости системы  $V_{гор}$  и вектора скорости ветра  $\vec{W}$  в системе координат  $O_0, X_0, Y_0, Z_0$  (Рис.1).

$\omega$  - угловая скорость поворота горизонтальной составляющей скорости системы  $V_{гор}$ .

Параметры установившегося движения системы ПК – груз определяются формулами:

$$V_{гор} = V \cos \theta, \quad (11)$$

$$V_{\text{вер}} = V \sin \theta, \quad (12)$$

$$V = \sqrt{\frac{2q_{\text{уд}} \cos \theta + P_{\text{уд}} \sin(\theta - \vartheta_r)}{C_y \rho \cos \gamma_a}}, \quad (13)$$

$$\theta = \arctg \frac{P_{\text{уд}} (\sin \vartheta_r + K \cos \gamma_a \cos \vartheta_r) - 1}{P_{\text{уд}} (\cos \vartheta_r - K \cos \gamma_a \sin \vartheta_r) + K \cos \gamma_a}, \quad (14)$$

$$\omega = \frac{g C_y \rho V \sin \gamma_a}{2 q_{\text{уд}} \cos \theta}, \quad (15)$$

$$q_{\text{уд}} = \frac{mg}{S_{\text{п}}}, \quad (16)$$

$$P_{\text{уд}} = \frac{P}{mg}, \quad (17)$$

$$K = \frac{C_x}{C_x}, \quad (18)$$

$$C_x = C_{\text{хп}} + C_{\text{хг}} \frac{S_{\text{г}}}{S_{\text{п}}}, \quad (19)$$

$$C_y = C_{\text{уп}} + C_{\text{уг}} \frac{S_{\text{г}}}{S_{\text{п}}}, \quad (20)$$

$m$  – масса системы,

$g$  – ускорение свободного падения,

$P$  – тяга силовой установки,

$\vartheta_r$  – угол тангажа груза,

$\gamma_a$  – угол аэродинамического крена системы ПК-груз.

Аэродинамические коэффициенты ПК и угол аэродинамического крена  $\gamma_a$  в установившемся режиме полета являются функциями управляющих воздействий:

$$C_{\text{хп}} = C_{\text{хп}}(\bar{\delta}_{\text{в}}), \quad (21)$$

$$C_{\text{уп}} = C_{\text{уп}}(\bar{\delta}_{\text{в}}), \quad (22)$$

$$\gamma_a = \gamma_a(\bar{\delta}_{\text{в}}, \bar{\delta}_{\text{н}}). \quad (23)$$

Алгоритм управления парашютом в процессе его снижения формируется из элементарных законов управления, реализующих:

- снижение по прямой с постоянным  $\psi_0$  и  $\theta$ ;
- управление углом наклона траектории  $\theta$  при нулевом угле аэродинамического крена  $\gamma_a$ ;
- разворот в горизонтальной плоскости с постоянным углом аэродинамического крена  $\gamma_a$ .

Элементарные законы управления формируются на основе анализа навигационной обстановки, которая определяется:

- 1) Координатами парашюта с грузом относительно точки посадки  $x_0, y_0, z_0$ ;
- 2) Составляющими скорости парашюта относительно воздушной среды  $V_{\text{гор}}, V_{\text{вер}}$ .
- 3) Ориентацией горизонтальной составляющей вектора скорости  $\psi_0$ ,

4) оценками скорости и направления ветра.

Часть навигационных параметров измеряется непосредственно, а часть оценивается по результатам текущих и предшествующих измерений.

Область начальных условий описывается множеством векторов  $\mathbf{R}$  и двумя углами, определяющими его положение относительно осей земной системы координат.

При постоянных значениях  $V_{гор}$ ,  $V_{верт}$ ,  $\gamma_a$  реализуемых при постоянных значений управляющих воздействий и ветрового воздействия могут быть построены аналитические выражения для элементарных траекторий движения. Это дает возможность оценить интервалы разброса конечных точек элементарных траекторий в зависимости от интервалов начальных условий, интервалов изменения ветрового воздействия, интервалов изменения управляющего воздействия. Применяя многократно эту процедуру для всего множества элементарных траекторий, построены связи конечных значений траектории с начальными условиями.

Разработаны и опробованы различные сочетания элементарных траекторий для различных типовых законов управления, базирующихся на непосредственном измерении измеряемых параметров движения и оценках скорости ветра. С помощью предложенной кинематической модели построены полные траектории при различных моделях ветрового воздействия.

### Список литературы

1. Сиразетдинов Т.К. Сложные системы и задача аналитического проектирования II // Известия вузов. Авиационная техника. 1981. №2, с. 51-55
2. Деваев В.М. К задаче управления посадкой летательного аппарата в условиях неопределенного ветрового воздействия // Известия вузов. Авиационная техника. 1990. №2, с. 26-30.
3. Деваев В.М. Динамика полета и управления парашюта-крыла: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.01. – Казань, 1994.-212 с.

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД**

### **Аннотация**

В работе предлагается вариант решения задачи оперативного прогнозирования результатов производственного процесса обогащения руд на основе имитационного моделирования. Проанализированы данные мониторинга процесса флотационного обогащения руды на примере производственной схемы фабрики «АНОФ-2».

### **Введение**

Месторождения комплексных апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, расположенного в центральной части Кольского полуострова, являются крупнейшими в мире по запасам апатита. Добычу и переработку руды осуществляет ОАО «Апатит», являющееся крупнейшим в мире предприятием по производству апатитового концентрата и основным поставщиком фосфорсодержащего сырья в России. Важнейшей задачей обогатительного производства является обеспечение максимальной эффективности извлечения полезных компонентов, снижение отходов и потерь.

На обогатительной фабрике «АНОФ-2» технология обогащения руд состоит из целого ряда отдельных операций [4]: дробления исходной руды, последующего измельчения, и флотационного выделения апатита по классической технологии с содержанием оксида фосфора ( $P_2O_5$ ) не менее 39,0 %.

### **Мониторинг показателей производственного процесса**

Для правильного ведения технологического процесса и своевременного выявления отклонений от технологического режима на современных обогатительных предприятиях достаточно широко используются автоматизированные системы сбора данных и осуществления оперативного диспетчерского управления (SCADA-системы) [2]. В настоящее время на обогатительной фабрике «АНОФ-2» внедрена система *IFix*, позволяющая проводить регулярный контроль технологических показателей в реальном времени.

Благодаря ее возможностям, оператор контролирует изменения параметров производственного процесса в реальном времени и следит за возможными отклонениями их значений от заданного регламента. Таким образом, на мониторе автоматизированного рабочего места оператора осуществляется визуализация параметров технологического процесса и оборудования с помощью мнемосхем, графиков, таблиц и т.д., а также отображения параметров состояния датчиков и устройств через регулярные промежутки времени (рис. 1).

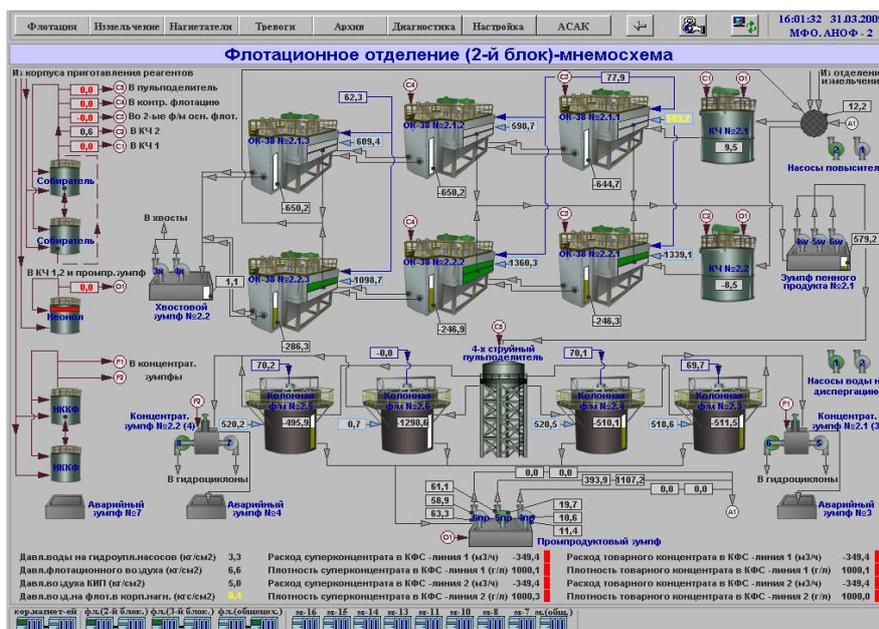


Рис. 1. Экранная форма диспетчерского монитора

Система *IFix* обладает возможностью дополнения функциями собственной разработки, что позволяет создать систему, полностью отвечающую всем требованиям и целям конкретного производства. Для уменьшения отрицательных последствий колебаний характеристик исходного сырья и параметров оборудования на качество продуктов обогащения, а также в силу инерционности производственного процесса (последствия управляющего воздействия проявляются с некоторой задержкой), необходимо внедрение в *SCADA*-систему функции управления технологическим процессом в упреждающем режиме. Реализация такой функции прогнозирования требует создания «быстродействующих» средств моделирования производственного процесса и возможных последствий управляющих воздействий [1].

Использование имитационного моделирования позволяет прогнозировать возможные варианты развития процессов, оценивать и анализировать влияние различных факторов и управляющих воздействий. Данный подход, как правило, не позволяет получить оптимальное в математическом смысле решение, но дает возможность в кратчайшее время получить результаты, варьируя значения управляющих параметров.

### Производственный процесс флотационного отделения

Результаты мониторинга параметров производственных процессов обогащения, реализуемого средствами *SCADA*-систем, обеспечивают информационный базис для создания имитационной модели флотационного отделения.

Применяемая на фабрике схема флотационного обогащения состоит из основной и контрольной флотации (применяются флотомашинны ОК-38) и одной разделительной операции «перечистка» с помощью колонных флотомашин (рис. 2). В результате выполнения основной и контрольной флотации из схемы выводятся хвосты. Пенный продукт основной флотации, содержащий большую

долю полезных минералов, подвергается перечистке. После этого пенный продукт является выводимым из схемы концентратом. Обедненный (камерный) продукт перечистки возвращается на вход основной флотации, формируя его циркулирующую нагрузку.

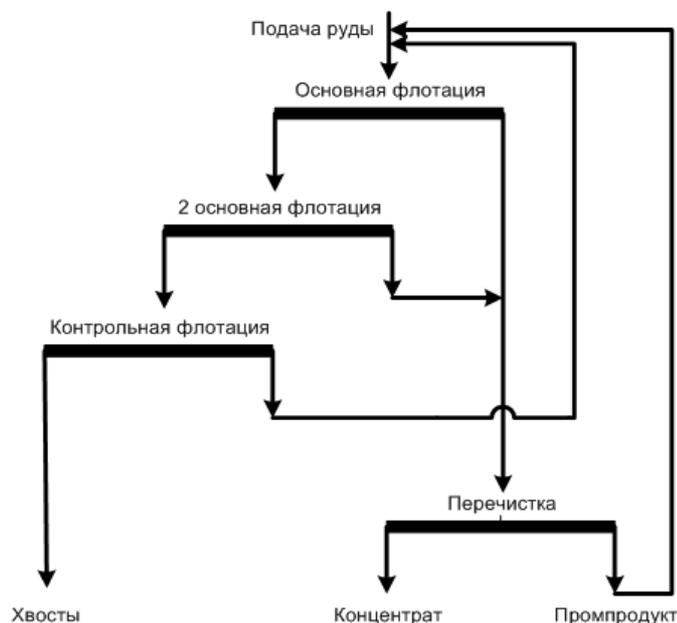


Рис. 2. Технологическая схема флотации

На флотацию поступает пульпа, характеризующаяся рядом свойств, определяющих ее поведение во флотационной камере. Эти свойства определяются как минералогическим составом, так и предшествующей обработкой в процессах дробления, измельчения, а также в контактных чанах [3]. В модели используются следующие параметры: объемный расход пульпы, поступающей на флотацию; ее плотность; содержание полезного компонента в исходной руде; температура пульпы; расход собирателя; расход воздуха во флотомашину; уровни пульпы во флотомашине; щелочность пульпы.

Исходным питанием флотации служат сливы классификаторов (мельниц). На основе данных мониторинга перед поступлением в контактный чан содержание апатита составляет 9-14% (таблица 1). Предполагается, что гранулометрический состав пульпы изменяется незначительно и содержание частиц класса крупности +0,16 мм составляет 18-21%. При этом средняя плотность 1200 кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 1

Основные показатели процесса флотации

Параметр	Среднее	Минимум	Максимум
P205 руда	11.765	8.94	14.260
Собиратель	55.139	42.37	68.420
Воздух основная	1067.418	999.45	1120.450
Воздух контрольная	745.889	699.88	900.370
Воздух колонная	498.496	446.86	550.240

Уровень основная	-319.548	-351.88	-298.390
Уровень контрольная	-342.325	-353.02	-333.390
Уровень колонная	-773.186	-890.99	-752.850
Щелочность	10.107	10.03	10.200
Температура	20.721	19.52	22.280

В результате анализа данных можно выделить основные зависимости между параметрами процесса:

- изменения удельного расхода реагентов отрицательно влияют на производительность флотомашин и качество продуктов обогащения. При избытке реагентов снижается селективность процесса, что приводит к образованию вязкой и обильной пены, к увеличению механического выноса породы в концентрат.

- увеличение содержания твердой фазы в пульпе (плотности пульпы) приводит к повышению производительности флотомашин и к снижению расходов реагентов, однако при этом ухудшается качество концентрата. Дальнейший рост содержания твердой фазы пульпы приводит к нарушению процесса.

- расход поступающей пульпы влияет на производительность флотомашин и качество продуктов обогащения, а также на уровень пульпы в камерах флотационных машин и концентрацию реагентов. При чрезмерном расходе пульпы даже при оптимальной плотности ухудшается качество продуктов обогащения, а при занижении расхода ухудшаются экономические показатели флотации из-за снижения производительности.

### **Заключение**

С учетом сложившейся ситуации непостоянного состава поступающей руды является актуальной задача упреждающего управления. Применяемые на фабрике «АНОФ-2» средства SCADA-системы обеспечивают необходимыми данными для построения имитационной модели обогатительного процесса. Имитационные модели дают возможность создания инструмента анализа, адекватного задаче поддержки оперативного управления обогатительным процессом флотации. Такой подход позволяет осуществить «тонкую настройку» параметров процесса флотации при варьировании характеристик исходного сырья и управляющих технологических показателей.

### **Список литературы**

1. Попова, Л.П. Механизм целевого доступа к данным мониторинга процессов обогащения на основе текстовых фильтров / Л.П. Попова, А.Г. Олейник // Информационные технологии в региональном развитии. - Апатиты, 2009. - Вып. IX. - С.108-111.

2. Попова, Л.П. Структурная модель системы управления технологическим процессом обогащения / Л.П. Попова, А.Г. Олейник // Сборник трудов десятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – том4. – с. 247-248.

3. Ульшин, В.А. Адаптивное управление технологическими процессами / В.А. Ульшин, Д.А. Зубов. – Луганск: изд-во ВЛУ им. В. Даля, 2002. – 210с.

4. Шилаев, В.П. Основы обогащения полезных ископаемых. Учебное пособие для вузов. / В.П. Шилаев - М.: Недра, 1986. – 296 с.

УДК 665.6:004.8

М.Б. Новоженин, А.Г. Лютов

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

### **Аннотация**

Рассматривается определение остаточного ресурса на примере нефтехимического оборудования. В основе предлагаемого метода лежит использование нейронной сети, которая позволяет учитывать нелинейность в изменениях. Диагностика, остаточный ресурс, нейронная сеть, нефтехимическое оборудование.

### **Введение**

При длительной эксплуатации оборудования нефтехимических производств неизбежно возникают повреждения или нарушения работоспособности его элементов даже при отсутствии дефектов изготовления и соблюдении правил эксплуатации. Это обусловлено особенностями нефтехимических производств [1]. Кроме того, даже при соблюдении технологической дисциплины при эксплуатации оборудования неизбежны колебания состава сырья и реагентов, в том числе содержания в них агрессивных компонентов; колебания регулируемых параметров, обусловленные запаздыванием регулирования. Воздействие указанных факторов в течение длительного времени вызывает повреждение металла. Развитие микродефектов на поверхностях нагруженных элементов оборудования или отложение на них осадков, препятствующих протеканию технологического процесса. В некоторые моменты функционирования оборудования могут возникать такие сочетания параметров, которые нарушают его работоспособность, т.е. вызывают отказы.

Остаточный ресурс оборудование может иметь не только до истечения расчетного срока службы, но и после него. Фактические режимы нагружения при соблюдении правил эксплуатации оказываются, как правило, менее напряженными, чем расчетные, что снижает интенсивность расходования заложенных запасов, обеспечивает резерв по остаточному ресурсу [2].

### **Постановка задачи**

Возможность прогнозирования величины остаточного ресурса обеспечивается при одновременном наличии следующих условий: известны параметры, определяющие техническое состояние оборудования (ПТС); известны критерии предельного состояния оборудования; имеется возможность периодического

(или непрерывного) контроля значений ПТС.

По многим характерным для нефтехимического оборудования деградиационным процессам (сплошной коррозии, изнашиванию, ползучести и др.) указанные условия выполняются. По другим видам повреждений (например, образованию трещин, межкристаллитной коррозии) не все условия, необходимые для прогнозирования остаточного ресурса могут выполняться.

Прогнозирование надежности оборудования обычно осуществляется по схеме. Через определенные периоды эксплуатации  $t_1, t_2, \dots$  и т.д. измеряют максимальные величины возникших повреждений (износа, коррозии, деформаций)  $h_1, h_2, \dots$  и т.д. и экстраполируют зависимость до предельно допустимой величины повреждений  $h_n$ . Такой метод позволяет получить достаточно точные оценки показателей надежности, если известен вид зависимости  $h(t)$  и при измерениях значений  $h$  определяются действительно максимальные значения повреждений [3].

Вид зависимости  $h(t)$  установлен для многих видов разрушения. При некоторых видах коррозии и изнашивания (трение, эрозионное) зависимость износа от времени линейная:  $h(t) = h_0 + C \cdot t$ , где  $h_0$  и  $C$  - постоянные величины для заданных условий.

В зависимости от требуемой достоверности прогноза и возможностей получения информации применяют два подхода к прогнозированию: упрощенный, основанный на детерминистических оценках показателей, и уточненный, основанный на вероятностных оценках.

### **Предлагаемый подход**

В данной работе предлагается подсистема интеллектуальной диагностики оборудования на базе искусственных нейронных сетей, когда существующая система технической диагностики дополнена интеллектуальной подсистемой, реализующей функции прогнозирования диагностических параметров в реальном времени и планирования оптимальных сроков технического обслуживания и ремонта для предотвращения отказов в процессе работы оборудования.

Подсистема прогнозирования диагностических параметров и планирования оптимальных сроков технического обслуживания решает сложные, ресурсоемкие и трудно формализуемые задачи. Реализация этой подсистемы осуществляется на базе методов искусственного интеллекта, в частности, искусственных нейронных сетей, нечеткой логики и генетических алгоритмов [4].

Методы контроля параметров можно разделить на две группы: прямого и косвенного контроля. Прямые методы контроля основаны на непосредственном определении размеров деталей. Косвенные методы измерения состояния более универсальны и позволяют осуществлять его во время технологического процесса.

К системе контроля состояния предъявляются следующие требования:

- учёта нелинейного и неравномерного характера изменения остаточной стойкости нефтехимического оборудования;
- учёта нелинейного изменения свойств материала стенок установки;

- прогнозирования и оптимизации параметров процесса образования коррозии;
- прогнозирование момента критического состояния установки;
- планирование замены нефтехимического оборудования.

Система диагностики должна, не останавливая технологический процесс, в реальном времени, определить по прямым и косвенным параметрам степень износа установки и сравнить ее с критическим пороговым значением, при котором требуется прекращение работы [5]. Система прогнозирования должна принять решение о дальнейшей программе действий:

- оптимизировать параметры технологического процесса;
- выполнить замену установки после очередной операции;
- остановить технологический процесс, чтобы выполнить замену нефтехимического оборудования.

В данной работе предлагается применение искусственных нейронных сетей с объемно-модульной архитектурой для решения задачи прогнозирования состояния нефтехимического оборудования, в которой можно выделить три основных функциональных блока (рис. 1):

1. Блок идентификации текущего состояния нефтехимического оборудования, т.е. текущей величины износа;
2. Блок прогнозирования времени до критического износа;
3. Блок оценки результата прогнозирования, осуществляющий оценку возможности продолжения технологического процесса на основе прогноза.

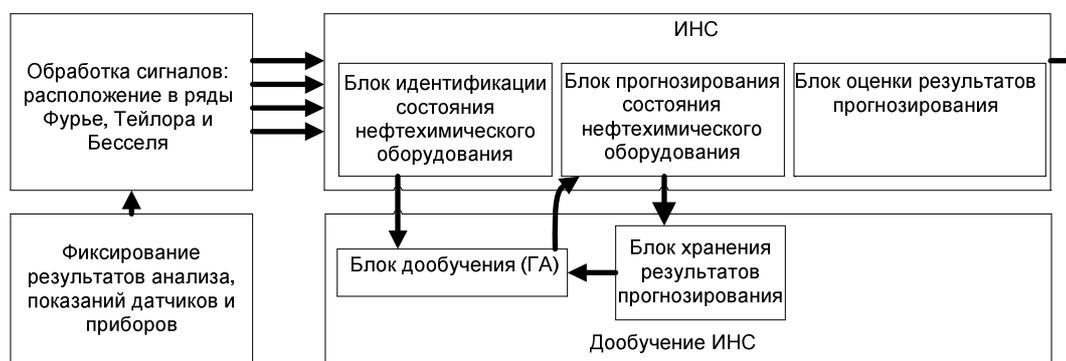


Рис. 1. Функциональная схема системы диагностики состояния нефтехимического оборудования

Блок идентификации определяет текущее значение величины износа и обучается перед началом работы системы. Блок прогнозирования состояния в процессе работы обучается на основе текущих фактических данных. На вход блока прогнозирования подается текущее значение износа. Выходом является оценка времени до наступления отказа оборудования.

Для обучения нейронной сети используются входные вектора  $p$  и выходные вектора  $y$ , причем  $p$  представлен значениями КПД 1 и 2 деэмульгатора, степенью очистки 1 и 2 хранилища дренажной воды, величиной затрат щелочи и временем работы установки; выходной вектор первой нейронной сети  $y$  – текущее значение износа, а второй,  $y_1$ , – время, до наступления отказа оборудования, в годах:

$$p1 = \begin{bmatrix} 84.5 \\ 84 \\ 99.9 \\ 89.9 \\ 40.5 \\ 0.6 \end{bmatrix}, p2 = \begin{bmatrix} 84 \\ 83.8 \\ 98 \\ 89 \\ 42 \\ 1 \end{bmatrix}, p3 = \begin{bmatrix} 83.2 \\ 83 \\ 96.5 \\ 86 \\ 70 \\ 2 \end{bmatrix}, p4 = \begin{bmatrix} 82.4 \\ 82 \\ 88.7 \\ 78.5 \\ 42.5 \\ 3.3 \end{bmatrix},$$

$$y0.1 = [5], y0.2 = [6], y0.3 = [8], y0.4 = [10],$$

$$y1.1 = [30], y1.2 = [29.9], y1.3 = [28], y1.4 = [27]$$

Схема нейронной сети из двух функциональных блоков представлена на рис.2:

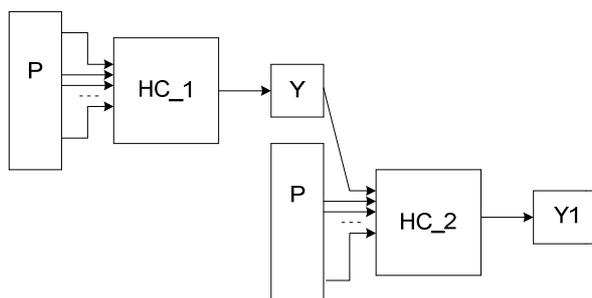


Рис. 2. Схема нейронной сети из двух функциональных блоков

Результаты вычислений нейронной сети представлены на рис. 3.

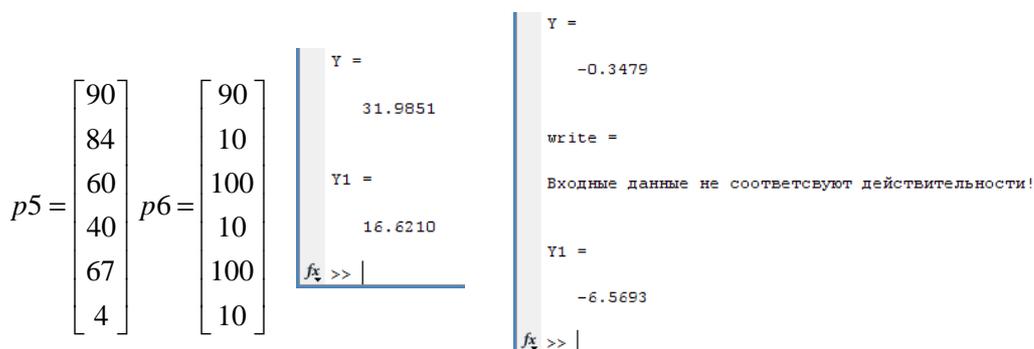


Рис. 3. Результаты определения остаточного ресурса с использованием нейронной сети

### Заключение

Таким образом, предполагается следующая система диагностики, которая позволяет:

- строить модель динамики изменения остаточного ресурса;
- проводить постоянное дополнительное обучение на основе фактических данных при помощи генетических алгоритмов.

Использование интеллектуальной системы диагностики в автоматизированном производстве позволяет повысить надежность и безопасность за счет своевременной замены изношенного нефтехимического оборудования и ввода корректировок управляемых параметров при ректификации.

## Список литературы

1. Биргер И.А. Техническая диагностика. -М.: Машиностроение, 1978.-240 с.
2. Вудфорд Д. Повреждение при ползучести и концепция остаточной долговечности. - Теоретические основы инженерных расчётов. (TR.ASME),1979, т.101, №4 с-1-8.
3. Михляев П.Г., Нешпор Г.С., Кудрявцев В.Г. Кинетика разрушения. - М.: Металлургия, 1979.-279с.
4. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс/ пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006.
5. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001, - 382с.

УДК 519.711.2

Д.А. Ноздрин

*Московский государственный институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета Высшая школа экономики,  
Москва*

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЯМИ (НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ)**

### **Аннотация**

Тема работы посвящена оптимизации функционирования и новому подходу к управлению сложными инженерными сетями. Реализация управления предполагается на основе сетевого подхода в противовес классически применяемому иерархическому подходу, что обеспечит адаптивность и устойчивость сети к изменениям структуры.

### **Введение**

Основной целью разработки новой модели интеллектуальной инженерной сети является разработка эффективного управления инженерными сетями, такими как сети газо- и водоснабжения, сети городского транспорта, электросети. Электросети были выбраны первичными для построения модели, как наиболее сложные для управления и имеющие ряд проблем, не решённых в текущих реализациях управления инженерными сетями.

Вопросами внедрения новых технологий сейчас занимаются многие энергокомпании. Но на данный момент системы управления электросетями не решают ни проблемы оптимизации перетоков, ни проблемы обеспечения потребителей разных категорий мощностью, не имеют механизмов автоматического управления генерацией электрического тока и анализа состояния ветвей. К тому же, такие системы крайне централизованы, в силу необходимости хранения значительного объема аналитической информации, что значительно сокращает адаптационные возможности к меняющейся конфигурации сети.

Чрезвычайно значимый момент для России момент – управление межсистемными перетоками, их надёжностью и устойчивостью. Если во многих странах мира в силу определенной концентрации производителей, близкого нахождения друг к другу производителей и потребителей, и отсутствия каких-то масштабных сетевых компонентов особых проблем управления сетевой частью нет, то для России из-за наличия длинных линий, слабой нагрузки, невысокой пропускной способности, оптимизация перетоков становится сложной задачей.

Еще одна проблема существующих решений в том, что генерируемая мощность некоторых потребителей всегда в целях стабильности не потребляется полностью, существует «запас по мощности», который можно было бы отдавать вовне, повышая стабильность электросети, экономя на транзите электроэнергии, повысив общую эффективность сети. На данный момент такая возможность не обеспечена существующими решениями.

### **Проблематика электроснабжения**

Электроснабжение определяется двумя факторами – качеством электроэнергии и надёжностью её снабжения. Показатели качества электрической энергии, методы их оценки и нормы определяет Межгосударственный стандарт: «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» ГОСТ 13109-97. Для оценки надёжности электроснабжения существует стандарт ANSI–IEEE1366-2003. Разрабатываемая модель учитывает требования данных стандартов.

Кроме того, одной из основных задач систем управления является увеличение запаса устойчивости системы. При анализе устойчивости электрической системы различают устойчивость статическую и динамическую. Статическая устойчивость характеризует устойчивость электрической системы при малых возмущениях, т.е. таких возмущениях, при которых исследуемая электросеть (ЭС) может рассматриваться как линейная. В инженерной практике исследование устойчивости электрической системы, как правило, проводят упрощённо, ориентируясь на практические критерии устойчивости, определяющие её наличие или отсутствие при некоторых вытекающих из практики допущениях.

Динамическая устойчивость определяет поведение ЭС после сильных возмущений, возникающих вследствие коротких замыканий, отключений линий электропередач и т.п. При анализе динамической устойчивости (система рассматривается как нелинейная) возникает необходимость интегрировать нелинейные трансцендентные уравнения высоких порядков. Для этого применяют аналоговые вычислительные машины и так называемые расчётные модели переменного тока; наиболее часто создают специальные алгоритмы и программы, позволяющие производить расчёты на ЦВМ.

## **Функциональное разделение модулей**

Развитие ЭС сопровождается непрерывным усложнением их структуры, изменением динамических свойств, усилением связности элементов. Для обеспечения надежного и безопасного функционирования ЭС, учитывая абсолютную неоднородность и разрозненность подсетей, а также древовидную структуру электросетей, разрабатываемая интеллектуальная сеть будет обладать способностью к самовосстановлению и адаптации к частым изменениям структуры. Понятие адаптивности сети понимается именно в этом смысле, и оно является одной из важных особенностей предлагаемой модели интеллектуальной инженерной сети (ИИС). Такие требования по адаптации абсолютно исключают централизованную структуру, в силу возможности выхода из строя либо просто отсутствия в текущей топологии каналов связи с «центральным» узлом. В таком случае сеть окажется нестабильной и неуправляемой. Поэтому необходима децентрализованная сетевая структура.

При сетевой структуре все узлы в состоянии генерировать в равной степени управление, таким образом, при разрыве сети в несколько изолированных подсетей, ИИС останется функционирующей. При восстановлении связей либо добавления новых узлов ИИС адаптируется и изменяет свою структуру. Эти изменения контролирует структурный модуль.

Демон (модуль) – комплексная часть системы управления ИИС, функционально изолированная от других демонов на каждом узле и имеющая набор четко ограниченных решаемых задач, не пересекающихся с задачами других демонов. Это позволяет разграничить ситуации, в которых срабатывают определенные алгоритмы. Таким образом, на каждом узле непосредственно сосуществует несколько функционально разделенных программных компонентов, которые взаимодействуют на равных правах. Основными из них являются следующие модули:

1. Структурно-зональный.
2. Статической устойчивости и целостности.
3. Динамической устойчивости.
4. Безопасности.
5. Прогностический.

Функции по обеспечению безопасности абсолютно необходимы в сетях промышленного масштаба. Это защита от любой попытки получения несанкционированного доступа к системе управления.

Прогностический модуль предназначен для сбора и анализа статистической информации о работе сети. Это позволит ускорить работу механизма принятия решений. Исходя из набранного аналитического материала, система при переходе будет проверять наиболее вероятные ситуации, и в случае совпадения ряда критериев получать готовое управление, вместо формирования «с нуля». В электросетях, для сохранения устойчивости системы, гораздо важнее получить близкое к оптимальному управление быстро, чем оптимальное – но позднее.

Статическая модель будет описывать инженерную сеть без учета переходных процессов. Сохранения статической устойчивости системы - одна

из важнейших задач для поддержания целостности системы. Задача сохранения статической устойчивости описывается системой матричных уравнений, исходя из электротехнических законов: законов Кирхгофа, баланса мощностей и пр. Статическая модель решает задачи обеспечения сохранения баланса мощностей, оптимизации перетоков, обеспечения потребителей мощностью, поддержания целостности системы при этих процессах.

Динамическая модель должна отражать переходные процессы в сети, и обычно задана системой дифференциальных уравнений. Генерируя управление в соответствии с динамической моделью, предоставляется возможность контролирования запаса по динамической устойчивости системы и сведения возможности дестабилизации к минимуму. Динамическая модель решает задачи поддержания целостности при переходных процессах - например, включение/выключение узлов, резкие перепады напряжения, аварийные ситуации.

### **Повышение быстродействия за счет разбиения на зоны**

Для ускорения расчетов вводится понятие «зон свободного перетока в электросети». Общая электросеть разбивается на несколько зон, каждая из которых отдельно просчитывается и обрабатывается ИИС. Такое разбиение позволяет значительно уменьшить размерность данных для обработки. Управление перетоками генерируется относительно текущей зоны, и только в случае выхода параметров за определенные границы, происходит запрос в соседнюю зону. Взаимодействие между зонами происходит посредством обмена информацией между граничными узлами. При современной архитектуре и правильно подобранном алгоритме, таких узлов немного, что упрощает задачу синхронизации зон.

Упрощенная суть алгоритма деления на зоны сводится к следующим пунктам:

- зона присваивается ребрам (линиям связи), а не узлам. Это устраняет возможность возникновения коллизий на границах (один элемент не может принадлежать двум зонам);
- распределение зон начинается с произвольного ребра;
- всем исходящим из узла ребрам назначается одна зона. Всем входящим в узел ребрам присваиваются разные зоны.

Рассмотрим пример изменения конфигурации сети – подключение нового потребителя. Первым к новому узлу проходит инициализирующий сигнал. Структурный модуль на соединенном с ним узле начинает работу по подготовке сети к подключению узла. Новый узел будет подключен к зоне, в которой находится смежный узел. Происходит запрос к динамическому демону – проверка, не выведет ли подключение узла и последующий «толчок» систему из состояния равновесия. В случае если такое возможно, динамический модуль возвращает в структурный демон либо параметры медленного пуска, позволяющие ввести узел в строй без выхода системы из строя, либо запрет на подключение нового узла (в таком случае, пожертвовав одним потребителем, обеспечивается стабильность всей системы). Если же система останется

устойчивой, происходит зачисление узла в зону, просчет статических параметров и последующая отправка сигналов о подготовке системы к подаче тока. После подачи тока запускается алгоритм оптимизации перетоков внутри зоны.

Важной особенностью управления электросетями являются требования по скорости работы – ограничение по времени на формирование управления интеллектуальной системой. Электросети – быстрые динамические системы, в случае аварии система управления на участке имеет в лучшем случае около 100мс на первичную реакцию. С другой стороны, задачи по оптимизации запаса статической и динамической устойчивости системы имеют порядок секунд или десятков секунд. Данные условия по скорости накладывают определенные условия на построение математической модели. В частности, учитываются сложности математических операций, ограничения на аппаратное обеспечение узлов, и необходимость разработки соответствующих быстродействующих алгоритмов. Помимо того в разрабатываемой системе вводится несколько уровней приоритетов, и каждая задача обрабатывается согласно данному приоритету. Основными уровнями приоритета являются:

1. Защита от несанкционированного доступа.
2. Поддержание стабильности и целостности системы.
3. Увеличение запаса по статической и динамической устойчивости системы.
4. Корректное распределение электроэнергии между потребителями по категориям.
5. Поддержание параметров качества.

В стабильном режиме ИИС будет заниматься поддержанием параметров качества электроснабжения. В случае изменения структуры сети, аварий, подключения/отключения потребителей и генераторов – первичной задачей выступает удержание целостности ИИС. После чего - обеспечение параметров надежности электроснабжения. От приоритета зависит частота запуска определенных алгоритмов.

### **Заключение**

Был проведён анализ основных интеллектуальных систем управления на рынке энергоснабжения. В результате изучения и сравнения показателей данных систем, был сделан вывод о классе проблем и задач, которые текущие системы не решают. На основе этого был сделан вывод об актуальности тематики и необходимости создания модели новой системы управления.

На текущий момент в разработке математической модели введена аксиоматика, сформулированы основные законы статической модели. Разработаны инновационные алгоритмы общей логики, позволяющие оптимизировать математический просчет модели интеллектуальной инженерной сети и повысить быстродействие формирования управления сетью. Модель имеет платформу для реализации и отвечает существующим государственным стандартам.

## Список литературы

1. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт, 2009, № 4 (15).
2. Электроэнергетика России 2030: Целевое видение / Под общ. ред. Б.Ф. Вайнзихера. – М.: Альпина Бизнес Бук, 2008.
3. European SmartGrids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.
4. <http://www.smartgrid.ru/>
  - а. Статья от 19.11.2011 генерального директора Института энергетической стратегии В.В.Бушуева «О перспективах Smart Grid в России».
  - б. Статья от 24.04.2012 «О практических мерах по внедрению технологий Smart Grid в России» А.Конева.

УДК 622.27:005.932

Л.Н. Родионова, О.Г. Кантор, И.Н. Гарифуллин

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

## УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСНЫМИ ПОТОКАМИ В СИСТЕМЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СНАБЖЕНИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

### Аннотация

Проблема эффективности использования средств, направляемых на обеспечение функционирования подразделений крупной компании, является актуальной ввиду того, что от правильной ее реализации зависит быстрота решения текущих производственных задач, и, как следствие, благосостояние самой компании. Непосредственная реализация данной задачи должна осуществляться с учетом взаимосвязи с другими основными экономическими и техническими задачами, стоящими перед компанией, что делает ее нетривиальной и обуславливает необходимость глубокого и всестороннего анализа, а также применения специальных методов ее решения.

В настоящей работе разработана и предложена экономико-математическая модель, являющаяся синтезом задач размещения производства и многопродуктовых транспортных задач.

### Актуальность

Предприятиям, работающим в трудно доступных районах на месторождениях нефти, особенно проблемно организовать движение ресурсных потоков. С целью совершенствования функционирования системы предприятий в нефтяной промышленности в работе предлагается создание в отдельных регионах с помощью либо ассоциации нефтяных предприятий, либо государства (совместная организация – наиболее привлекательна) – коммерческо-производственной

компании (КПК), владеющий рядом центров запасов материалов и средств производства. Основная цель функционирования КПК – максимальное удовлетворение потребностей предприятий при безусловной рентабельности собственных предприятий.

Проблема эффективности использования средств, направляемых на обеспечение функционирования подразделений крупной компании, является актуальной ввиду того, что от правильной ее реализации зависит быстрота решения текущих производственных задач, и, как следствие, благосостояние самой компании. Как правило, на практике существует множество возможных вариантов для непосредственной реализации указанной проблемы: создание региональных, межрегиональных или точечных центров обеспечения средствами производства, материалами и сырьем; кооперация с другими компаниями и пр. Более того, ее непосредственная реализация должна осуществляться с учетом взаимосвязи с другими основными экономическими и техническими задачами, стоящими перед компанией, что делает ее нетривиальной и обуславливает необходимость глубокого и всестороннего анализа, а также применения специальных методов ее решения.

Сложность решения указанной проблемы зависит от многовариантности расположения центров обеспечения средствами производства, материалами и сырьем (далее «центры»). Расположение таких центров на значительном расстоянии от поставщиков влечет за собой рост издержек на приобретение необходимой продукции, а удаленность от непосредственных потребителей (предприятий) приведет к росту издержек при осуществлении транспортировок. Также необходимо заранее определять емкость таких центров (площадь построек, количество персонала и средств технического оснащения), которая в свою очередь зависит от потребностей предприятий. Как правило, места для расположения центров заранее известны, в то время как их емкость подлежит определению. Оптимальным, очевидно, будет такое решение, которое обоснует емкость планируемых к организации центров, с позиций минимизации издержек на приобретение, доставку потребителям, строительство и эксплуатацию. Однако если стоимость строительства и эксплуатации одинаковых по емкости центров не разнится в зависимости от их местоположения, задачу можно решать без учета данных статей расходов.

### **Методы исследования**

Наиболее эффективным подходом к решению такого рода задач является применение экономико-математического моделирования, в рамках которого разработаны методики практического решения различных типов задач оптимального планирования. Сущность экономико-математического моделирования состоит в изучении объекта как сложной системы (статической или динамической), состоящей из множества функционирующих и взаимодействующих элементов. При этом очевидно, что изменения, происходящие с одним из элементов, влияют на эффективность системы в целом.

Большое значение для практики имеют модели линейного программирования, в которых все соотношения между анализируемыми величинами описы-

ваются линейными функциями. Среди линейных экономико-математических моделей особое место занимает модель транспортной задачи. Сущность транспортной задачи в классической постановке состоит в оптимальном (с позиций минимизации затрат) прикреплении поставщиков однородного продукта ко многим потребителям этого продукта. Для решения транспортной задачи разработаны развитая теория и модификации прямого и двойственного симплекс-метода (многопродуктовые задачи). Сама модель транспортной задачи линейного программирования может использоваться для планирования ряда операций, не связанных с перевозкой грузов. Так, с ее помощью решаются задачи по оптимизации размещения производства, топливно-энергетического баланса, планов загрузки оборудования и др. Однако, следует отметить, что для практики большее значение имеют, так называемые, многопродуктовые модели, в которых от поставщиков к потребителям перевозятся различные виды груза.

Для решения сформулированной выше проблемы в настоящей работе разработана и представлена математическая модель, являющаяся синтезом задач размещения производства и многопродуктовых транспортных задач.

Будем полагать, что рассматривается возможность создания центров обеспечения средствами производства и материалами, необходимыми для работы группы  $M$  предприятий, входящих в одну компанию, при следующих допущениях:

- определены  $K$  возможных мест размещения таких центров;
- номенклатура средств производства и материалов насчитывает  $N$  единиц;
- известны затраты на приобретение и доставку каждой единицы номенклатуры в любой из предполагаемых центров  $c_j^p$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $p = \overline{1, K}$ ;
- известны потребности каждого предприятия во всех средствах производства и материалах  $b_{ij}$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ;
- известна стоимость доставки каждой единицы номенклатуры из любого центра до всех предприятий  $a_{ij}^p$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $p = \overline{1, K}$ .

Требуется определить количество каждого вида ресурсов  $x_{ij}^p$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $p = \overline{1, K}$ , которое следует доставлять на предприятия из центров для обеспечения минимальных издержек, связанных с их приобретением и доставкой (рис. 1). Каждая стрелочка, соединяющая предприятия и предполагаемые центры, на рис. 2.2 обозначает количество груза по всей номенклатуре, подлежащего доставке из соответствующего центра данному предприятию.

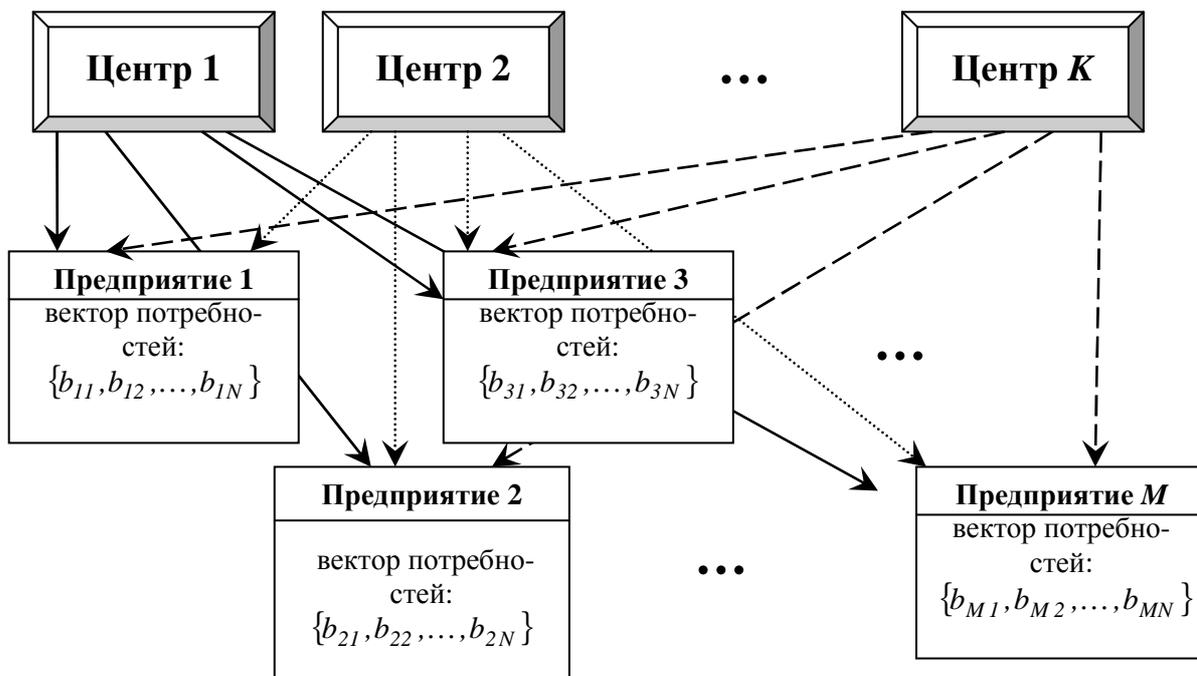


Рис. 1. Графическое представление проблемы создания центров обеспечения ресурсами

Величина  $a_{ij}^p x_{ij}^p$  показывает, в какую сумму обойдется доставка  $j$ -го вида средств производства и материалов на  $i$ -е предприятие из  $p$ -го центра в количестве  $x_{ij}^p$ . Просуммировав эти величины по всем предприятиям, центрам и видам номенклатуры, получим общие затраты на доставку для обеспечения потребностей предприятий –  $\sum_{p=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij}^p x_{ij}^p$ . Величина  $\sum_{i=1}^M x_{ij}^p$  показывает какое количество  $j$ -го вида средств производства и материалов должно находиться в  $p$ -м центре. Соответственно, выражение  $\left(\sum_{i=1}^M x_{ij}^p\right) c_j^p$  определяет затраты на приобретение и доставку  $j$ -го вида средств производства и материалов в  $p$ -й центр, а выражение  $\sum_{p=1}^K \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^M x_{ij}^p\right) c_j^p$  – суммарные затраты на приобретение и доставку всей номенклатуры в центры.

В введенных обозначениях постановка задачи будет следующей:

$$\sum_{p=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij}^p x_{ij}^p + \sum_{p=1}^K \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^M x_{ij}^p\right) c_j^p \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\sum_{p=1}^K x_{ij}^p = b_{ij}, \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, N}, \quad (2)$$

$$x_{ij}^p \geq 0, \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, N}, \quad p = \overline{1, K}. \quad (3)$$

Данная модель относится к классу линейных, а учитывая неотрицательность коэффициентов  $a_{ij}^P$  и  $c_j^P$ , а также условия (2) и (3), можно утверждать, что решение любой задачи, описываемой моделью (1)-(3), существует. Действительно, множество допустимых решений представляет собой выпуклый многогранник, расположенный в первом координатном угле пространства переменных задачи, и являющийся частью гиперплоскости порядка  $NM(K-1)$ , образованной пересечением непараллельных гиперплоскостей (2) в пространстве размерности  $NMK$ , из чего в свою очередь следует, что он невырожденный. Так как решение любой задачи линейного программирования находится в угловой точке многогранника решений (или в нескольких угловых точках), следовательно, для модели (1)-(3) решение всегда будет существовать. При необходимости в модель (1)-(3) может быть добавлено требование целочисленности переменных (всех или некоторых), что должно быть обусловлено смыслом конкретной практической задачи.

Число переменных модели (1)-(3) равно  $KMN$ . Нетрудно заметить, что уже при небольших значениях величин  $K$ ,  $M$ ,  $N$  число переменных велико. Этот факт обуславливает основную сложность данной модели. Однако, учитывая современный уровень развития вычислительной техники и программного обеспечения, численная реализация модели (1)-(3) для практических задач не представляет собой неразрешимую задачу. В случае небольших размерностей (до 100 переменных) для численной реализации модели (1)-(3) возможно использование таких программных продуктов, как MS Excel и Mat Card. Если же число переменных задачи существенно выше, следует воспользоваться специальными методами.

### **Декомпозиция модели (1)-(3) в случае большой размерности**

Ранее было отмечено, что основная сложность модели (1)-(3) связана с большим количеством переменных. Однако специфика разработанной модели такова, и это является ее несомненным достоинством, что в случае большой размерности задачи к ней может быть применен подход, основанный на принципе декомпозиции. Согласно принципу декомпозиции основная задача должна разбиваться на ряд задач меньшей размерности, на основании решения которых будет определяться решение исходной задачи.

Модель (1)-(3) допускает множество вариантов декомпозиции исходной проблемы на непересекающиеся вспомогательные задачи. Объясняется это неотрицательностью коэффициентов целевой функции и возможностью разбиения множества ограничений (2)-(3) на непересекающиеся подмножества. Покажем это.

Пусть,  $L$  такое, что  $1 \leq L < N$ ,  $L \in Z$ . Тогда  $\forall L$  справедливо следующее преобразование целевой функции:

$$\begin{aligned}
& \sum_{p=1}^K \sum_{l=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij}^p x_{ij}^p + \sum_{p=1}^K \sum_{j=1}^N \left( \sum_{i=1}^M x_{ij}^p \right) c_j^p = \\
& = \sum_{p=1}^K \sum_{l=1}^M \left( \sum_{j=1}^L a_{ij}^p x_{ij}^p + \sum_{j=L+1}^N a_{ij}^p x_{ij}^p \right) + \sum_{p=1}^K \left( \sum_{j=1}^L \left( \sum_{i=1}^M x_{ij}^p \right) c_j^p + \sum_{j=L+1}^N \left( \sum_{i=1}^M x_{ij}^p \right) c_j^p \right) = \\
& = \left( \sum_{p=1}^K \sum_{l=1}^M \sum_{j=1}^L a_{ij}^p x_{ij}^p + \sum_{p=1}^K \sum_{j=1}^L \left( \sum_{i=1}^M x_{ij}^p \right) c_j^p \right) + \left( \sum_{p=1}^K \sum_{j=L+1}^N \sum_{i=1}^M a_{ij}^p x_{ij}^p + \sum_{p=1}^K \sum_{j=L+1}^N \left( \sum_{i=1}^M x_{ij}^p \right) c_j^p \right)
\end{aligned} \tag{4}$$

Следовательно, исходную модель можно представить как объединение двух моделей. Первая имеет вид:

$$\sum_{p=1}^K \sum_{l=1}^M \sum_{j=1}^L a_{ij}^p x_{ij}^p + \sum_{p=1}^K \sum_{j=1}^L \left( \sum_{i=1}^M x_{ij}^p \right) c_j^p \rightarrow \min \tag{5}$$

$$\sum_{p=1}^K x_{ij}^p = b_{ij}, \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, L}, \tag{6}$$

$$x_{ij}^p \geq 0, \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, L}, \quad p = \overline{1, K}. \tag{7}$$

Вторая имеет вид:

$$\sum_{p=1}^K \sum_{l=1}^M \sum_{j=L+1}^N a_{ij}^p x_{ij}^p + \sum_{p=1}^K \sum_{j=L+1}^N \left( \sum_{i=1}^M x_{ij}^p \right) c_j^p \rightarrow \min \tag{8}$$

$$\sum_{p=1}^K x_{ij}^p = b_{ij}, \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{L+1, N}, \tag{9}$$

$$x_{ij}^p \geq 0, \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{L+1, N}, \quad p = \overline{1, K}. \tag{10}$$

### Результаты исследования

Множества переменных задач (5)-(7) и (8)-(10) являются непересекающимися, поэтому решение исходной задачи будет определяться следующим образом:

- оптимальный план задачи (1)-(3) (оптимальные значения переменных) является объединением оптимальных решений каждой из задач (5)-(7) и (8)-(10);

- оптимальное значение целевой функции задачи (1)-(3) является суммой оптимальных значений целевых функций задач (5)-(7) и (8)-(10).

Последнее следует из свойств линейных функций с неотрицательными коэффициентами, определенных на множестве неотрицательных чисел.

Очевидно, что аналогичную декомпозицию можно произвести, если  $1 \leq L < M$ . Таким образом, максимальное количество непересекающихся задач, которые можно получить из основной модели (1)-(3), прибегая к декомпозиции таким способом, равно  $MN$ . При этом размерность каждой из таких задач будет равна  $K$ .

Приведенные рассуждения доказывают, что при разумном количестве рассматриваемых к организации центров обеспечения ресурсами (до 100 еди-

ниц), численная реализация модели (1)-(3) может быть осуществлена с применением стандартных программных продуктов, таких как пакет «Поиск решения» в *MS Excel*, что не приведет к значительным тратам на программное обеспечение.

Данные результатов реализации поставленной задачи являются основой для принятия управленческих решений в отношении целесообразности организации каждого центра в отдельности, а также их организационного статуса.

### Список литературы

1. Гольштейн Е.Г. Теория двойственности в математическом программировании и её приложения – М., 1971. – 352 с.

2. Киселёва Е.М. Непрерывные задачи оптимального разбиения множеств: теория, алгоритмы, приложения: Монография / Е.М. Киселёва, Н.З. Шор – К., 2005. – 564 с.

УДК 004.052.3

Д.В. Павлюченко, Динь Туан Лонг

*«МАТИ» - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского*

## САМОНАСТРОЙКА ФУНКЦИЙ И СВЯЗЕЙ В ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЕ

### Аннотация

В настоящей работе рассмотрен подход к клеточной реконфигурации и адаптивной маршрутизации, реализуемый на базе модели управляемой естественно-подобной среды.

### Введение

Важной задачей разработки многопроцессорных систем (МПС) критического применения является обеспечение их отказоустойчивости. Для обеспечения длительного функционирования без прерывания вычислений в условиях возникающих отказов процессорных элементов (ПЭ) система дополняется средствами автоматической замены неисправных элементов резервными [1-3]. При этом средства замены должны быть адаптивными, приспособленными для реконфигурации системы при изменении размеров МПС, числа и расположения отказавших и резервных элементов и сохраняющими масштабируемость МПС.

Авторами рассмотрен клеточный подход к обеспечению и сохранению способности к реконфигурации и масштабируемости многопроцессорных систем с резервными элементами в условиях многочисленных отказов ПЭ [4-6]. Цель достигается построением МПС на базе адаптивных самонастраивающихся многопрограммных процессорных элементов. Децентрализованная самонастройка элементов системы выполняется распределенной клеточной

средой реконфигурации, приводящей к восстановлению логической структуры МПС для произвольного числа и глобального расположения в сети отказавших и резервных узлов.

В работе представлен клеточный алгоритм отказоустойчивой маршрутизации – настройки связей между перемещающимися источниками и приемниками в среде с отказами.

В реконфигурированной МПС информация о достижимости цели формируются автоматически клеточным путем на основании простой обработки минимальных данных о состоянии только смежных соседей. При этом клеточный алгоритм маршрутизации на основании результатов реконфигурации всегда находит минимальный маршрут от источника к приемнику через работоспособные узлы. Применение результатов реконфигурации в алгоритме отказоустойчивой маршрутизации позволило рассматривать клеточные среды реконфигурации и маршрутизации как взаимосвязанные средства обеспечения отказоустойчивости МПС.

### **Объект исследования**

Структура отказоустойчивой многопроцессорной системы представляется ортогональной графовой решеткой из  $m \times n$  узлов (вершин) где  $m$  – число узлов по оси ординат,  $n$  – число узлов по оси абсцисс. При свертывании границ решетки по вертикали и горизонтали, она превращается в тор. Процессорный элемент МПС является универсальным элементом замены, позволяющим перестраивать его на функции любого из четырех соседних элементов. При этом рабочий ПЭ хранит собственный программный модуль и копии программных модулей соседних ПЭ, а резервный элемент – только копии соседей. Резервный ПЭ МПС служит для восстановления исходного числа рабочих работоспособных элементов и заменяет один из соседних ПЭ, используя ПМ этого элемента.

Каждый ПЭ имеет физический адрес, постоянно закрепленный за ним и логический адрес, характеризующий исполняемый элементом ПМ. В начальном состоянии физический и логический адреса ПЭ совпадают. В случае отказов элементов с помощью клеточной реконфигурации выполняется изоляция неисправных процессорных элементов, включение в работу необходимого числа резервных ПЭ и настройка работоспособных элементов на новые логические адреса программных модулей.

### **Управляемая естественно-подобная среда поиска маршрутов**

Для снижения числа обрабатываемых переменных и функциональной сложности среды вычисления маршрутов целесообразно использовать естественно-подобные среды, физические законы функционирования которых позволяют получать значения требуемых характеристик маршрутов.

В настоящей работе для параллельного вычисления непересекающихся маршрутов восстановления МПС и маршрутов передачи сообщений применена управляемая токопроводящая решетка, обеспечивающая получение непрерывных значений характеристик маршрутов. Узел решетки (рис. 1) в

каждом направлении  $k = \overline{1,4}$  включает резистор  $R$  для снятия значения тока, ключ связи с соседним узлом  $sw_k^{ij}$ . Состоянием ключа  $sw_k^{ij}$  (замкнуто/разомкнуто) управляет сигнал  $y_k^{ij}$ . Общая точка узла, связывающая резисторы  $R$  через ключи  $sw_0^{ij}, sw_E^{ij}$ , соединена с потенциалами  $E$  и  $0$  соответственно.

При выполнении реконфигурации узел, соответствующий отказавшему процессорному элементу  $P_k^{ij} (x_0^{ij} = 1)$ , получает потенциал  $E$ , а узел, используемый в качестве резерва ( $x_r^{ij} = 1$ ), получает нулевой потенциал (см. рис.1). Инициация маршрутизации сообщения наступает при запросе  $P_{ij}$  на передачу данных. Узел источника подключается к потенциалу  $E$ , на узле приемника фиксируется нулевой потенциал. Для узлов, принадлежащих отказавшим ПЭ, на этапе маршрутизации сообщений связи с соседними узлами разрываются.

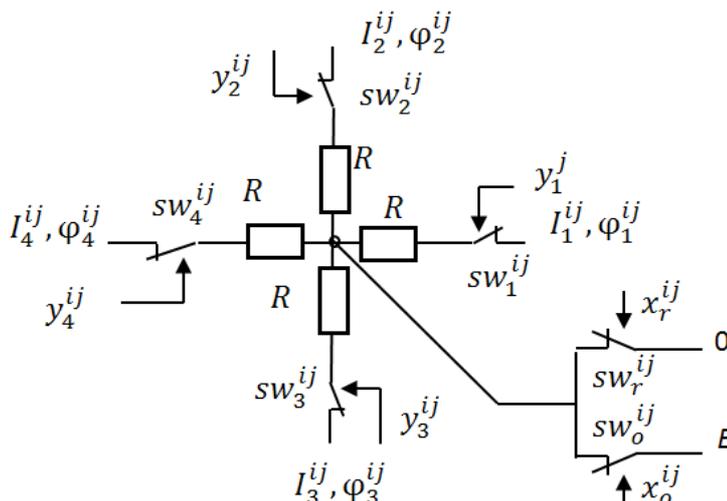


Рис. 1. Структура узла токопроводящей решетки

Закономерности функционирования представленной среды позволяют получать значения характеристик удаленности от резервных элементов для любого узла решетки. Построение маршрутов в решетке базируется на следующем утверждении.

Утверждение. Направление максимального вытекающего тока из узла соответствует направлению кратчайшего маршрута к резервному элементу.

Из утверждения следует, что значение максимального тока определяет направление минимальной удаленности узла с потенциалом  $E$  от узла с нулевым потенциалом. Поскольку нулевой потенциал имеют узловые точки резервных элементов на этапе реконфигурации и узлы приемников сообщений на этапе маршрутизации, то направление максимального вытекающего тока соответствует направлению минимального маршрута к узлу (резервному ПЭ/приемнику сообщения) с нулевым потенциалом.

Управление связями в модели токопроводящей среды позволяет адаптироваться к появлению столкновений маршрутов и обеспечить построение минимальных непересекающихся маршрутов от мест отказов к резервным элементам. Переназначение логических адресов выполняется для минимального множества работоспособных элементов, принадлежащих маршрутам.

### **Организация клеточной реконфигурации и адаптивной маршрутизации**

Реконфигурация и адаптивная маршрутизация реализуются клеточной средой, распределенной в решетчатой структуре МПС. Каждый ПЭ ( $P_{ij}$ ) структуры имеет собственную ячейку ( $c_{ij}$ ) управления реконфигурацией и маршрутизацией.

В процессе реконфигурации, инициируемой появлением очередного отказа, ячейка  $c_{ij}$  сохраняет логический адрес в  $P_{ij}$ , либо изменяет его на физический адрес одного из соседей. По запросу от ПЭ на передачу сообщения ячейка  $c_{ij}$  определяет принадлежность узла ( $i,j$ ) приемнику или ретранслятору сообщения и коммутирует канал для дальнейшей передачи сообщения.

Ячейка  $c_{ij}$  клеточной среды включает элемент перенастройки ПЭ в режиме реконфигурации ( $\mathcal{E}P_{ij}$ ), элемент выбора направления передачи сообщения в режиме маршрутизации ( $\mathcal{E}M_{ij}$ ), элемент определения длины минимального маршрута от текущего узла до целевого элемента ( $\mathcal{E}D_{ij}$ ) (в режиме реконфигурации целевым является резервный элемент, в режиме маршрутизации – приемник сообщения).

Выполняемые функции распределены между элементами среды. Клеточная среда, состоящая из элементов  $\mathcal{E}M_{ij}$ , обеспечивает поиск приемника сообщения и выбор направления маршрута для каждого промежуточного узла. Среда элементов  $\mathcal{E}D_{ij}$  используется как при реконфигурации, так и при маршрутизации и формирует данные о минимальном расстоянии от текущего узла до приемника или до резервного элемента в зависимости от решаемой задачи. Клеточная среда элементов  $\mathcal{E}P_{ij}$  управляет связями среды элементов  $\mathcal{E}D_{ij}$  до получения структуры из непересекающихся маршрутов и управляет настройкой процессоров МПС в режиме реконфигурации.

### **Заключение**

Представленная клеточная среда обеспечивает реконфигурирование МПС с неисправными элементами и передачу в ней сообщений по минимальным маршрутам независимо от количества и расположения неисправных и резервных элементов, без сбора и записи глобальной информации в каждом ПЭ. Ядром клеточной среды явилась естественно-подобная управляемая среда, формирующая для узлов данные о минимальных длинах маршрутов при решении задач реконфигурации и адаптивной маршрутизации.

Разработанный клеточный алгоритм управления естественно-подобной средой обеспечил создание клетки настройки и маршрутизации. Ее интеграция в процессорный элемент дает возможность построить самореконфигурируемый ПЭ с самонастройкой связей при передаче сообщений. МПС на базе таких элементов масштабируются без потери свойств реконфигурируемости и адаптивной маршрутизации.

Универсальный клеточный подход к реконфигурации, не зависящий от числа и размещения отказавших и резервных элементов, обеспечивает исправление любой комбинации до четырех отказов при числе резервных элементов не менее четырех.

Результаты клеточной реконфигурации при определении маршрутов передачи сообщений дали возможность находить новое расположение источников и приемников в реконфигурированной многопроцессорной системе без записи в каждом ПЭ глобальных данных о позициях отказов.

Разработанные алгоритмы направлены на получение максимальной корректирующей способности для однородных масштабируемых отказоустойчивых систем со взаимным резервированием функций в диапазоне отказов от одного до  $r$  ( $r$  - число резервных элементов).

### Список литературы

1. Черкесов Н.Г. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб.: Питер, 2005.
2. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем.- М.: Дрофа, 2008.
3. Катаев О.В. Об одном подходе к построению отказоустойчивых бортовых многопроцессорных вычислительно-управляющих систем // Искусственный интеллект. 2008. №4. С. 538-544.
4. Колосков В.А., Медведев А.В., Медведева М.В. Построение клеточных алгоритмов самоорганизации мультимикроконтроллеров с программируемым резервом // АиТ. 2002. №1. С. 161-172.
5. Medvedeva M.V., Koloskov V.A. Self-Organization of Cellular Environment and Reproduction of the Network Logical Structure // Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, 2003. Vol.502/2-3, P. 540-542.
6. Колосков В.А., Римский С.Д. Использование континуально-логических клеточных автоматов для управления реконфигурацией однородной мультимикроконтроллерной системы // Материалы XVII Всероссийского семинара Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных. Красноярск, ИПК СФУ, 2009. С. 67-69.

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

### Аннотация

Предложено решение проблемы разработки методологических и теоретических основ создания автоматизированных систем терминального управления процессами электролитно-плазменной обработки на базе спектральных методов диагностики неконтролируемых свойств поверхности по характеристикам электрических параметров процесса.

### Введение

Современные наукоемкие электротехнологические процессы позволяют осуществлять высокоэффективную модификацию поверхностных слоев при производстве ответственных деталей энергетических машин. К таким процессам относится электролитно-плазменная обработка (ЭПО), позволяющая наносить или удалять защитные покрытия, проводить очистку и полирование поверхностей, осуществлять химико-термическую обработку [1]. От традиционных методов ЭПО выгодно отличается экологической безопасностью производства, а маркетинговые исследования показывают перспективность применения процессов ЭПО в секторах замещения гальванических покрытий, подготовки поверхности под нанесение ионно-плазменных покрытий и в инновационных областях применения. Целью данного исследования является разработка метода терминального управления технологическими процессами ЭПО на основе спектральных методов диагностики состояния объекта, обеспечивающего повышение производительности, качества обработки и снижение энергоемкости при производстве деталей энергетических машин.

### Методология спектральной диагностики процессов ЭПО

Разработаны методологические основы диагностики процессов электролитно-плазменной обработки на основе анализа спектральных характеристик электрических параметров процессов [2]. Предложен метод активной идентификации процессов ЭПО с формированием оксидного слоя по импедансным спектрам объекта управления на основе изменяющихся во времени оценок комплексных частотных характеристик (КЧХ) проводимости электролизера:

$$\hat{G}(t, j\omega) = \frac{\hat{I}(t, j\omega)}{\hat{U}(t, j\omega)}, \quad (1)$$

где  $\hat{I}(t, j\omega)$  и  $\hat{U}(t, j\omega)$  – практически доступные оценки преобразования Фурье для сигналов тока  $i(t)$  и напряжения  $u(t)$  соответственно:

$$\hat{U}(t, j\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} a(\tau) u(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (2)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  – круговая частота,  $a(t)$  – эффективное временное окно, ограниченное временем измерения  $T$ . Разработанный метод активной идентификации позволяет осуществлять диагностику процессов ЭПО как напрямую с использованием информативных диапазонов частот изменяющихся во времени оценок КЧХ, так и с помощью схем замещения, разрабатываемых на их основе по методикам электрохимической импедансной спектроскопии.

Разработан также метод пассивной идентификации процессов ЭПО на основе изменяющихся во времени оценок спектров переменной составляющей тока, которая генерируется парогазовой оболочкой за счет отрицательного наклона рабочего участка ВАХ [3]. Спектральный состав колебаний в информативном сигнале тока определяется с использованием финитного спектра сигнала  $i(t)$ , зарегистрированного в течение отрезка времени  $T$ , центрированного относительно момента времени измерения  $t$ , а для снижения влияния случайных воздействий используется статистический спектр, усредненный на интервале времени  $\Delta t$ :

$$S_{y_T}(t, f)_{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} \frac{1}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} i(\tau) \exp(-j2\pi\nu\tau) d\tau \right|^2 d\nu. \quad (3)$$

Предложенный метод пассивной идентификации позволяет осуществлять диагностику процессов ЭПО по изменению спектральных характеристик в информативных диапазонах частот.

Обобщение результатов статистического спектрального анализа электрических характеристик процессов ЭПО формирует методологию их диагностики (рис. 1), позволяющую извлекать информацию о состоянии поверхности в ходе плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО), электролитно-плазменного полирования (ЭПП) и удаления покрытий (ЭПУП).

### Методология терминального управления процессами ЭПО

Разработан метод терминального управления процессами электролитно-плазменной обработки на основе решения задачи простого синтеза, в которой находится управление  $F(X, t)$ , (где  $X$  – управляющие воздействия,  $t$  – время), не обязательно оптимальное, но приводящее к целевой модификации поверхности:

$$F(X, t): \{ \Phi_1(F(X, t)) \geq S_1 \} \cap \{ \Phi_v(F(X, t)) < S_v \} \cap \{ \delta(t) < \delta_{\max} \} \cap \{ F(X, t) \in F_{\text{доп}} \}, \quad (4)$$

где  $\Phi_v(\cdot)$  – функционалы качества обработки ( $v = 1 \dots V$ ),  $S_v$  – предельные значения ограничений,  $\delta$  – плотность тока.

Предложена структура автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) ЭПО (рис. 2). Управляющие воздействия  $X$  формируются в виде напряжения источника и температуры электролита, которые стабилизируются во времени в 1-м контуре управления.

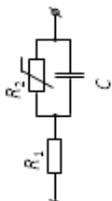
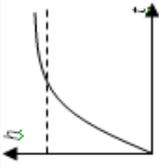
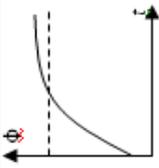
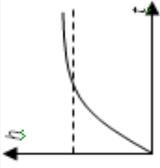
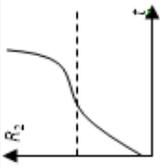
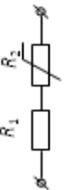
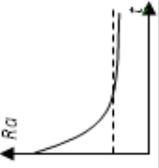
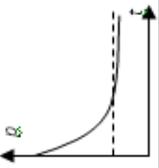
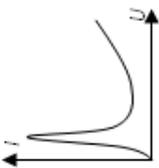
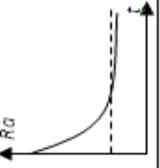
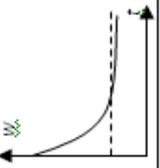
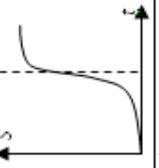
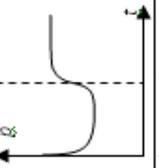
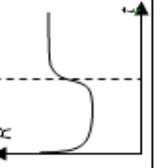
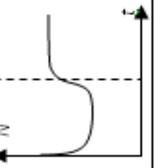
Тип идентификации	Специфические свойства объекта управления	Тип ЭПО	Неконтролируемая переменная состояния ОУ	Информативный сигнал	Динамика неконтролируемой переменной ОУ	Динамика информативного сигнала ОУ	Приоритет способа
Активная	Формируется оксидный слой 	ПЭО	Толщина покрытия ( $h$ )	Разность фаз между эквивалентными синусоидами тока и напряжения ( $\varphi$ )			Патент РФ № 2366765
(Нужен генератор для оценки частотных свойств)				Активное сопротивление покрытия в схеме замещения ( $R_2$ )			[4]
Пассивная	Формируется парогазовая оболочка 	ЭПШ	Шероховатость поверхности ( $R\alpha$ )	СПМ переменной составляющей тока в диапазоне частот 0,5...1,5 кГц ( $\varphi$ )			Патент РФ № 2240500
(ПЭО генерирует колебания тока в диапазоне 0...10 кГц)		ЭПУП	Площадь поверхности, освобожденной от покрытия ( $S$ )	Ширина нормированного спектра переменной составляющей тока (по уровню 0,2...0,5) ( $\psi$ )			Патент РФ № 2133943
			Скорость удаления покрытия ( $R = \frac{\Delta h}{\Delta t}$ )	СПМ переменной составляющей тока в диапазоне частот 0,5...3,5 кГц ( $\varphi$ )			Патент РФ № 2227181
			Количество выбросов тока в секунду ( $M$ )	Количество выбросов тока в секунду ( $M$ )			Патент РФ № 2360045

Рис. 1. Методология диагностики процессов ЭПО по спектральным характеристикам электрических параметров

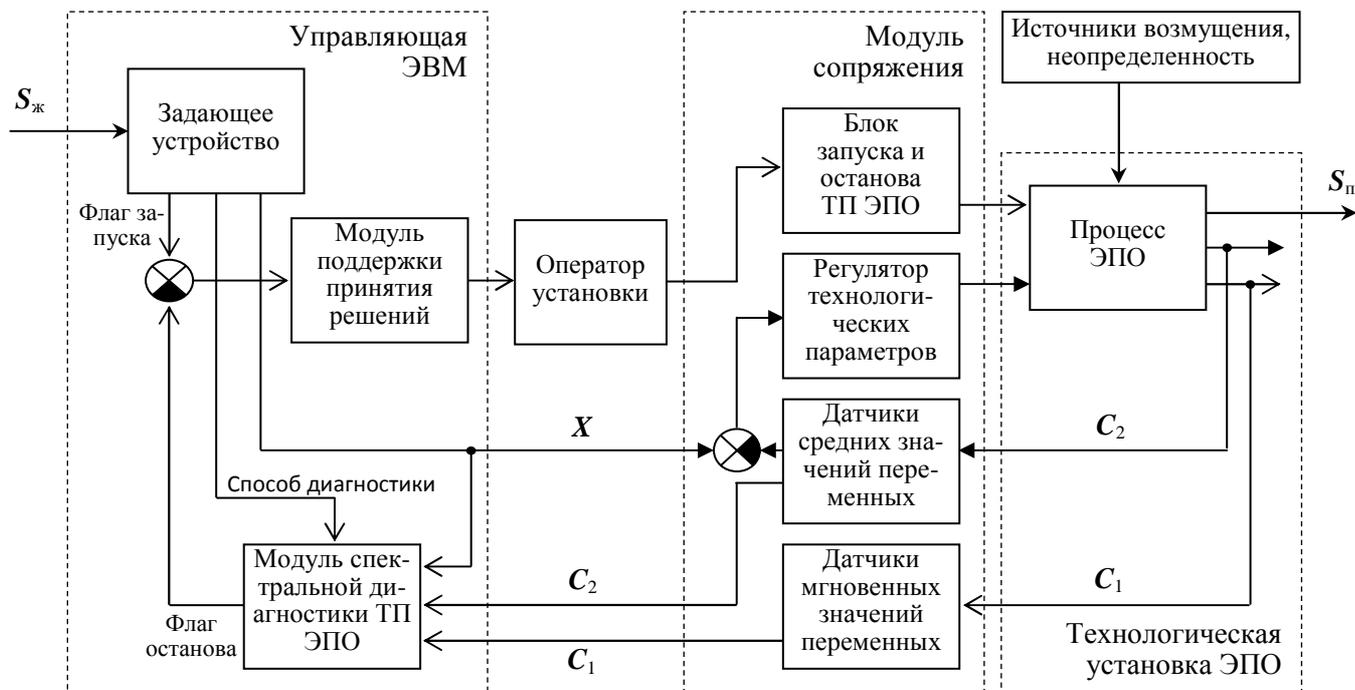


Рис. 2. Структурная схема АСУ ТП ЭПО с терминальным управлением на основе спектральных методов диагностики состояния объекта

Во 2-м контуре реализовано управление терминальным моментом окончания процесса при достижении свойствами поверхности  $S_{п}$  заданной окрестности желаемых свойств  $S_{ж}$ . Решение о наступлении терминального момента времени принимается на основе спектральных методов диагностики состояния объекта.

### Выводы

Таким образом, разработан метод терминального управления процессами ЭПО, позволяющий повысить качество оксидирования, полирования и удаления покрытий, снизить процент брака и уменьшить энергопотребление в 1,2...1,5 раз за счет исключения времени обработки в конце процесса, не приводящего к целевому модифицированию поверхности.

### Список литературы

1. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / Под ред. И. В. Суминова. – М. : Техносфера, 2011. – 464 с.
2. Methodology of Data Acquisition and Signal Processing for Frequency Response Evaluation during Plasma Electrolytic Surface Treatments / E.V. Parfenov, A. Yerokhin // Process Control: Problems, Techniques and Applications. Ed. S. P. Werther. – New York: Nova Publ., 2011. P. 63-96.
3. Управление технологическими процессами электролитно-плазменной обработки на основе пассивной идентификации свойств поверхностного слоя / Е.В. Парфенов // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 215–224.
4. Диагностика параметров процесса электролитно-плазменной обработки / Е.В. Парфенов, Р.Р. Невьянцева, А.Л. Ерохин // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 6. С. 7–15.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ КОЛЁСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

### Аннотация

В работе предложен нелинейный закон управления для стабилизации нестационарной траектории мобильного робота с двумя степенями свободы на основе кинематической и динамической модели. Задача решена на основе применения знакопостоянных функций Ляпунова.

Задачи управления неголономными системами представляют в настоящее время значительный теоретический и прикладной интерес. Такие системы характеризуются наличием кинематических неинтегрируемых связей, которые возникают в задачах управления механическими системами с качением, такими, например, как колесные экипажи, мобильные роботы, манипуляторы на подвижной платформе и т.д.

Целью настоящей работы является решение задачи стабилизации нестационарной траектории мобильного робота с двумя степенями свободы на основе кинематической модели. Применение знакопостоянной функции Ляпунова, в отличие от стандартной знакоопределенной, позволило упростить структуру управления.

### Постановка задачи

Рассмотрим модель колёсного мобильного робота с двумя степенями свободы [1], которая описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos \theta, \\ \dot{y} &= v \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= \omega\end{aligned}\tag{1}$$

где  $v$  — линейная скорость и  $\omega$  — угловая скорость мобильного робота;  $(x, y)$  — декартовы координаты центра масс транспортного средства, и  $\theta$  — угол между главным направлением робота и осью  $Ox$  (рис. 1).

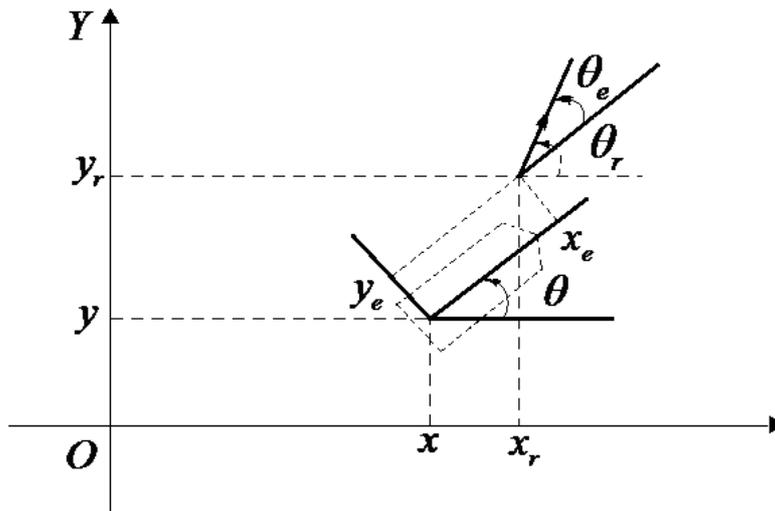


Рис. 1. Модель двухколёсного мобильного робота

Мы рассмотрим задачу отслеживания некоторой траектории отслеживания  $p_r(t) = (x_r, y_r, \theta_r)^T$  на основе построения законов управления  $v(t)$  и  $\omega(t)$ .

### Решение задачи

Введём отклонение от заданной траектории по формуле

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

где  $x_r, y_r, \theta_r$  – функции, определяющие заданную траекторию движения робота.

Тогда дифференциальные уравнения в отклонениях примут вид

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \omega y_e - v + v_r \cos \theta_e \\ \dot{y}_e = -\omega x_e + v_r \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e = \omega_r - \omega \end{cases} \quad \text{- кинематическая модель} \quad (3)$$

Выберем следующий закон управления для  $\omega(t)$

$$\omega = \omega_r + k_1 \theta_e, \quad k_1 = \text{const} > 0$$

С помощью функции Ляпунова  $V_1 = \frac{1}{2} \theta_e^2$  можно показать, что данный закон управления обеспечивает асимптотическую устойчивость решения  $\theta_e = 0$  для последнего уравнения системы (3).

С помощью метода знакопостоянной функции Ляпунова покажем, что закон

$$v = v_r + k_2 x_e, \quad k_2 = \text{const} > 0$$

обеспечивает асимптотическую устойчивость нулевого решения  $x_e = y_e = \theta_e = 0$  системы (3), описывающей кинематическую модель.

В работе [2] разработан метод применения знакопостоянных функций Ляпунова в задаче об асимптотической устойчивости нулевого решения неав-

тономных дифференциальных систем на основе применения уравнений сравнения и предельных функций и уравнений.

Функция  $V_1$  является знакопостоянной, при этом нулевое решение  $x_e = y_e = \theta_e = 0$  системы (3) равномерно асимптотически устойчиво относительно множества  $\{V_1 = 0\}$  и семейства предельных совокупностей  $\{X^*, W^*\}$ . Здесь функции  $X^*, W^*$  обозначают предельные функции к правой части системы уравнений (3) и к производной функции  $V_1$  по времени в силу системы (3) соответственно [2].

Действительно, множество  $\{V_1 = 0\} = \{\theta_e = 0\}$ .

Для предельной к (3) системы

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \omega^* y_e - v^* + v_r^* \cos \theta_e \\ \dot{y}_e = -\omega^* x_e + v_r^* \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e = -k_1 \theta_e \end{cases}$$

на множестве  $\{\theta_e = 0\}$  получим

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \omega^* y_e - v^* + v_r^* \\ \dot{y}_e = -\omega^* x_e \end{cases} \quad (4)$$

Где  $v^* = v_r^* + k_2 x_e$ ,  $\omega^* = \omega_r^*$ .

С помощью функции Ляпунова  $V_2 = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2)$  получим неравенство  $\dot{V}_2 \leq -k_2 x_e^2$ . При этом множество  $\{x_e = 0\}$  не содержит решения системы (4), кроме нулевого.

Таким образом, закон управления

$$\begin{cases} \omega = \omega_r + k_1 \theta_e \\ v = v_r + k_2 x_e \end{cases}$$

обеспечивает равномерную асимптотическую устойчивость нулевого решения  $x_e = y_e = \theta_e$  уравнений в отклонениях для кинематической модели.

Рассмотрим теперь динамическую модель робота с двумя степенями свободы.

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \omega y_e - v + v_r \cos \theta_e \\ \dot{y}_e = -\omega x_e + v_r \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e = \omega_r - \omega \\ \dot{v} = u_1 \\ \dot{\omega} = u_2 \end{cases} \quad (5)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  - моменты обобщенных сил, которые выбираются в качестве управления.

С помощью процедуры метода бэкстеппинга построим законы управления  $u_1$  и  $u_2$  для этой модели.

Сделаем замену переменных  $v_1 = v - v_r - k_2 x_e$ ,  $\omega_1 = \omega - \omega_r - k_1 \theta_e$ .

Получим систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_e = (\omega_1 + \omega_r + k_1\theta_e)y_e - v_1 - v_r - k_2x_e + v_r \cos \theta_e \\ \dot{y}_e = -(\omega_1 + \omega_r + k_1\theta_e)x_e + v_r \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e = -\omega_1 - k_1\theta_e \\ \dot{v}_1 = u_1 - \dot{v}_r - k_2\dot{x}_e \\ \dot{\omega}_1 = u_2 - \dot{\omega}_r - k_1\dot{\theta}_e \end{array} \right. \quad (6)$$

Положив  $\tilde{u}_1 = u_1 - \dot{v}_r - k_2\dot{x}_e$ ,  $\tilde{u}_2 = u_2 - \dot{\omega}_r - k_1\dot{\theta}_e$ , преобразуем систему в каскадное соединение двух подсистем

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_e = (\omega_1 + \omega_r + k_1\theta_e)y_e - v_1 - v_r - k_2x_e + v_r \cos \theta_e \\ \dot{y}_e = -(\omega_1 + \omega_r + k_1\theta_e)x_e + v_r \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e = -\omega_1 - k_1\theta_e \\ \left[ \begin{array}{l} \dot{v}_1 = \tilde{u}_1 \\ \dot{\omega}_1 = \tilde{u}_2 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (7)$$

Выберем функции  $\tilde{u}_1$  и  $\tilde{u}_2$  в виде  $\tilde{u}_1 = -k_3 \text{sat}(v_1)$ ,  $\tilde{u}_2 = -k_4 \text{sat}(\omega_1)$ , где  $k_3, k_4$  - положительные постоянные,  $\text{sat}(\cdot)$  - функция насыщения, имеющая вид

$$\text{sat } x = \begin{cases} \text{sign } x, & \text{если } |x| \geq \gamma \\ \frac{x}{\gamma}, & \text{если } |x| < \gamma \end{cases} \quad (\gamma = \text{const} > 0 - \text{малое число})$$

Можно показать, что нулевое решение  $x_e = y_e = \theta_e = v_e = 0$  системы (7) равномерно асимптотически устойчиво. Таким образом, управления  $u_1$  и  $u_2$  будут иметь вид:

$$\begin{aligned} u_1 &= \dot{v}_r + k_2(\omega y_e - v + v_r \cos \theta_e) - k_3 \text{sat}(v - v_r - k_2x_e), \\ u_2 &= \dot{\omega}_r + k_1(\omega_r - \omega) - k_4 \text{sat}(\omega - \omega_r - k_1\theta_e). \end{aligned}$$

Работа выполнена при финансовой поддержке рффи (12-01-33082).

### Список литературы

1. Буданов В.М., Девянин Е.А. О движении колесных роботов // ПММ. 2003. т.67, вып. 2. с. 244—255.
2. Перегудова О.А. Метод сравнения в задачах устойчивости и управления движениями механических систем. Ульяновск: УлГУ, 2009. 253 с.

## **ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНОЙ ПЛАТФОРМЫ С НЕТОЧНО ИЗВЕСТНОЙ МАССОЙ И С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

### **Аннотация**

В работе предложен дискретный закон управления с запаздыванием для отслеживания нестационарной траектории мобильной платформы с тремя омни-колесами в предположении, что масса платформы известна неточно. На основе метода функций Ляпунова получены оценка области начальных отклонений и ограничения на максимальную величину запаздывания, неизвестную часть матрицы инерции, проведено компьютерное моделирование процесса управления.

### **Постановка задачи**

Актуальными являются исследования, посвященные вопросам разработки новых методов и алгоритмов нелинейного управления колесными мобильными системами, обеспечивающих вывод системы на заданную траекторию и стабилизацию движения вдоль нее, в условиях неполной информации о массо-инерционных характеристиках платформы, действии внешних возмущений, наличия запаздывания в структуре обратной связи. В работе [1] построено дискретное управление с постоянным запаздыванием для кинематической модели колесного робота с омни-колесами. Такая конструкция предполагает, что на колесах робота закреплены ролики, оси вращения которых лежат в плоскости колес. Благодаря наличию таких колес, возможно осуществлять движение робота в любом направлении без предварительного разворота, что значительно повышает маневренность робота и позволяет использовать его в тесных помещениях. При этом остается открытым вопрос о построении дискретного управления с переменным запаздыванием, в том числе, для динамических моделей. В настоящей работе рассматривается задача об отслеживании траектории мобильного робота с тремя роликонесущими колесами при условии, что в структуре управления присутствует неопределенное изменяющееся запаздывание и масса платформы неизвестна. Задача решена при помощи дискретного управления с функцией насыщения. На основе метода функций Ляпунова и применения преобразований типа Б.С. Разумихина [2] получены: ограничения на параметры системы, максимальную величину запаздывания и оценка области начальных отклонений. Эффективность предложенного закона управления подтверждается результатами численного моделирования.

Уравнения управляемого движения по горизонтальной плоскости мобильного робота с тремя омни-колесами (рис. 1) под действием моментов, развиваемых электродвигателями постоянного тока, при отсутствии проскальзывания колес имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} (m + \Delta m)\ddot{\xi} + h\dot{\xi} + m_d\dot{\psi}\dot{\eta} = \sin\psi u_1 + \sin(\psi + \frac{2\pi}{3})u_2 + \sin(\psi + \frac{4\pi}{3})u_3 \\ (m + \Delta m)\ddot{\eta} + h\dot{\eta} - m_d\dot{\psi}\dot{\xi} = -\cos\psi u_1 - \cos(\psi + \frac{2\pi}{3})u_2 - \cos(\psi + \frac{4\pi}{3})u_3 \\ (I + \Delta I)\ddot{\psi} + 2a^2h\dot{\psi} = -a(u_1 + u_2 + u_3) \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь  $\xi$  и  $\eta$  – координаты центра платформы робота в неподвижной декартовой системе координат  $O\xi\eta\zeta$ ;  $\psi$  – угол поворота платформы вокруг вертикали, отсчитываемый от оси  $\xi$ ;  $u_1, u_2$  и  $u_3$  – управляющие напряжения, подаваемые на электродвигатели;  $a$  – расстояние от центра платформы до центра каждого колеса; постоянная  $h$  определяется коэффициентом момента противоэлектродвижущей силы и радиусом колеса;  $m, I$  и  $m_d$  – известные составляющие массо-инерционных параметров системы;  $\Delta m$  и  $\Delta I$  – неизвестные составляющие массы платформы и ее момента инерции соответственно, удовлетворяющие ограничениям:  $|\Delta m| < \Delta m_0 = \text{const}$ ,  $|\Delta I| < \Delta I_0 = \text{const}$ , причем будем предполагать, что:  $\Delta m_0 < m$ ,  $\Delta I_0 < I$ .

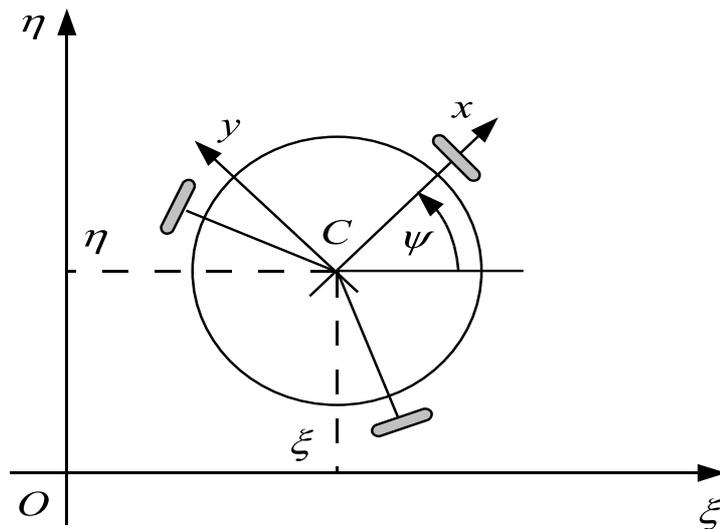


Рис. 1

Предполагается, что в структуре обратной связи присутствует некоторое неизвестное переменное запаздывание  $\tau(t) \leq \tau_0 = \text{const} > 0$ . Пусть  $\mathbf{q}_0(t) = (\xi_0(t), \eta_0(t), \psi_0(t))^T$  – некоторая дважды непрерывно дифференцируемая ограниченная функция, определенная при всех  $t \geq -\tau_0$ .

Задача об отслеживании траектории  $\mathbf{q}_0(t)$  робота в общей постановке состоит в следующем.

Требуется найти управление  $\mathbf{u}(t - \tau(t))$  ( $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)^T$ ,  $|\mathbf{u}| < u_0 = \text{const}$ ) и указать ограничения на параметры системы и траектории, при которых для некоторого числа  $\varepsilon > 0$  (погрешности слежения) найдутся число  $\delta > 0$  и момент

времени  $t^* > 0$ , что для любой начальной функции  $\varphi(s)$ ,  $-\tau_0 \leq s \leq 0$ , удовлетворяющей ограничению

$$\max_{-\tau_0 \leq s \leq 0} |(\varphi(s) - \mathbf{q}_0(s), \dot{\varphi}(s) - \dot{\mathbf{q}}_0(s))| < \delta$$

для всех решений системы (1) с начальным условием  $\mathbf{q}(s) = \varphi(s)$ ,  $-\tau_0 \leq s \leq 0$ , при всех  $t \geq t^*$  будет иметь место неравенство  $|\mathbf{q}(t) - \mathbf{q}_0(t)| < \varepsilon$ . Здесь символом  $|\bullet|$  обозначена некоторая векторная норма в действительном пространстве соответствующей размерности.

### Решение задачи

Для решения задачи слежения найден дискретный закон управления  $\mathbf{u}_k = \mathbf{u}(t_k - \tau(t_k))$ ,  $k = 1, 2, \dots$  следующего вида

$$\mathbf{u}_k = P^{-1}(y_3(t_k - \tau(t_k)) + \psi_0(t_k))[\text{diag}(hk_1, hk_1, 2a^2hk_3)\text{sat}(\mathbf{z}(t_k - \tau(t_k)))] + \mathbf{g}_0(t_k) \quad (2)$$

здесь матрица  $P^{-1}(\bullet)$  – обратная матрице коэффициентов при управлении  $\mathbf{u}$  в правой части системы (1);  $y_3 = \psi - \psi_0(t)$ ;  $k_1, k_3$  – коэффициенты управления, выбор которых должен обеспечивать выполнение условия ограниченности управления:  $|\mathbf{u}| < u_0 = \text{const}$  и достаточной скорости сходимости к заданному движению; вектор-функция насыщения  $\text{sat}(\mathbf{z}) = (\text{sat}(z_1), \text{sat}(z_2), \text{sat}(z_3))^T$  имеет следующие компоненты:

$$\text{sat}(z_i) = \begin{cases} \text{sign}(z_i), & |z_i| \geq \gamma, \\ \frac{z_i}{\gamma}, & |z_i| < \gamma, \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \quad \gamma = \text{const} > 0$$

$$z_1(t) = c \left( \xi(t) - \xi_0(t) + \frac{m(\dot{\xi}(t) - \dot{\xi}_0(t))}{h} \right), \quad z_2(t) = c \left( \eta(t) - \eta_0(t) + \frac{m(\dot{\eta}(t) - \dot{\eta}_0(t))}{h} \right)$$

$$z_3(t) = c \left( \psi(t) - \psi_0(t) + \frac{I(\dot{\psi}(t) - \dot{\psi}_0(t))}{2a^2h} \right)$$

Здесь  $c > 1$  – некоторое число. Функция насыщения с большим углом наклона линии переключения (при достаточно малой постоянной  $\gamma$ ) является непрерывной аппроксимацией релейной функции. Тем самым, выбор закона управления в виде (2), с одной стороны, позволит уменьшить амплитуду колебаний [3], возникающих при наличии запаздывания в структуре релейного управления, а с другой стороны, обеспечит свойство робастности по отношению к вариациям параметров системы.

Получены достаточные условия, позволяющие решать задачу слежения для широкого класса нестационарных траекторий колесного робота. Примененные функции Ляпунова  $\mathbf{V} = \mathbf{V}(\mathbf{y}, \mathbf{z})$  с компонентами вида кубической векторной нормы

$$\mathbf{V} = (V_1, V_2)^T, \quad V_1 = \max(|y_1|, |y_2|, |z_1|, |z_2|), \quad V_2 = \max(|y_3|, |z_3|)$$

позволило получить эффективные достаточно легко проверяемые условия, без находений и оценок собственных значений нестационарных матриц, что сокращает время вычислений.

На рис. 2 показаны: траектория движения центра масс робота (сплошная линия), отслеживаемая траектория (штриховая линия) и траектория центра масс при управлении

$$\mathbf{u}_k = P^{-1}(y_3(t_k - \tau(t_k)) + \psi_0(t_k)) \left[ \frac{1}{2} \text{diag}(hk_1, hk_1, 2a^2hk_3) \mathbf{z}(t_k - \tau(t_k)) + \mathbf{g}_0(t_k) \right] \quad (3)$$

построенном на основе метода вычисляемого момента (пунктирная линия). Из рисунка видно, что управление (2) обеспечивает меньшую погрешность слежения по сравнению с законом (3).

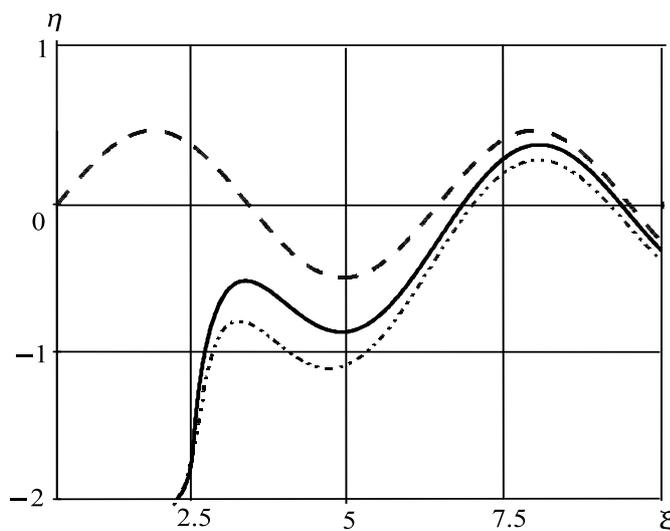


Рис. 2

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (12-01-33082) и Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0373 по проекту «Развитие методов и алгоритмов исследования задач об управлении нелинейными механическими системами и компьютерное моделирование управляемого движения системы тел».

### Список литературы

1. Velasco-Villa M., B. del-Muro-Cuellar and Alvarez-Aguirre A. Smith-predictor compensator for a delayed omnidirectional mobile robot // Proceedings of the 15<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control & Automation, Athene-Greece, July 27-29, 2007.
2. Разумихин Б.С. Устойчивость эредитарных систем. М.: Наука, 1988. 106 с.
3. Халил Х.К. Нелинейные системы. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2009. 832 с.

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОФПРИГОДНОСТИ ОПЕРАТОРОВ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **Аннотация**

Разработана модель профессиональной пригодности оператора эргатических систем управления (ЭСУ) в виде иерархической многосвязной системы профессионально-важных качеств (ПВК). Предложен подход вынесения решения о профпригодности операторов с использованием средств интеллектуальной поддержки принятия решений, выбран математический аппарат для ее реализации.

### **Введение**

Оценка профессиональной пригодности операторов ЭСУ является одной из наиболее действенных мер обеспечения надежности человека в структуре ЭСУ и снижения влияния, так называемого, «человеческого фактора».

При этом считается, что предварительный профессиональный отбор позволяет уменьшить отсев при профессиональном обучении на 30...40 % и значительно уменьшить материальные и временные затраты на подготовку оперативного персонала.

Таким образом, задача получения точной и достоверной оценки уровня профессиональной пригодности является важной и актуальной, решение которой имеет существенное значение для обеспечения надежности человеческого звена в структуре ЭСУ.

Целью работы является разработка модели профпригодности и модели принятия решений при оценке профпригодности.

### **Теоретический анализ**

На сегодня известна модель профпригодности [1] в соответствии с которой профпригодность определяется в виде множества отдельных метрик – профессионально-важных качеств. Для расчета интегральной оценки профпригодности используют взвешенную алгебраическую сумму оценок ПВК [2]. Недостатком данного подхода является использование четко определенного перечня ПВК и весовых коэффициентов, определяющих их вклад в оценку профпригодности, в результате чего модель ориентирована на строго определенную операторскую специализацию.

Оценку профпригодности можно осуществить на основе анализа эффективности деятельности оператора на отдельных ее этапах [3]. В этом случае показатель профпригодности является функцией от надежности человека-оператора и оценивается по количеству безошибочных действий в процессе выполнения операторской деятельности. Данный подход пригоден для исследования профпригодности квалифицированных операторов и мало подходит для обучающихся и кандидатов на операторские должности.

Известен подход к оценке профпригодности посредством исследования на сенсорном, когнитивном и моторном уровнях взаимодействия оператора и технической системы [4]. При этом формируется некоторая тестовая задача и исследуются временные затраты оператора на ее решение при различных внешних условиях, которые характеризуют профпригодность.

На основе анализа деятельности оператора и причин возникновения внештатных и аварийных ситуаций представим надежность оператора в виде:  $R = f(P f(E, O))$ , где  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$  – совокупность внешних факторов ( $e_1$  – факторы трудовой среды,  $e_2$  – алгоритмизации действий,  $e_3$  – автоматизации,  $e_4$  – организации трудового процесса),  $O = \{o_1, o_2, o_3\}$  – совокупность внутренних факторов ( $o_1$  – информационные,  $o_2$  – организационные,  $o_3$  – психофункционального состояния).

Известно, что для успешного освоения и выполнения операторской деятельности, человек должен обладать набором ПВК  $A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ .

Тогда, интегральный показатель профпригодности основанный на оценке ПВК определится в виде:  $P = \bigcup_{i=1}^n a_i$ .

Функционалом качества профпригодности при этом будет является:

$$I = f\{(a_i, E, O), \dots, (a_n, E, O)\},$$

где  $a_1, \dots, a_n$  – отдельные ПВК,  $E$  – совокупность внешних факторов,  $O$  – совокупность внутренних факторов.

Для повышения достоверности оценки о профпригодности оператора число ПВК должно стремиться к бесконечности, что приводит к комбинаторному взрыву и чрезмерной сложности вычислительных алгоритмов.

Согласно этому, разработана модель профпригодности и процесса принятия решения в классе иерархических систем на основе метода анализа иерархий, заключающаяся в выборе 12 наиболее значимых для данного вида операторской деятельности ПВК и разбиении их на 3 группы с соответствующими весовыми коэффициентами, рис.1.

При этом, так как ПВК, в общем случае, не поддаются измерению, предложено их оценивать посредством измерения соответствующих психофизиологических (ПФ) параметров, характеризующих ПВК.

В данной схеме ОУТ представляет собой корень дерева (интегральный показатель профпригодности оператора);  $z_1, \dots, z_3$  – нетерминальные вершины (группировки ПВК), свертки II этапа;  $a_1, \dots, a_{12}$  – нетерминальные вершины (ПВК), свертки I этапа;  $x_1, \dots, x_n$  терминальные вершины - частные влияющие факторы влияния (ПФ параметры, характеризующие ПВК).

Зависимость показателя профпригодности от ПВК моделируется:

$$OUT = f(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12})$$

на основе четырех баз знаний, которые описывают такие зависимости:

$$z_1 = f_2(a_1, a_2, a_3, a_4), z_2 = f_2(a_5, a_6, a_7, a_8), z_3 = f_2(a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}) \text{ и } z = f_3(z_1, z_2, z_3).$$

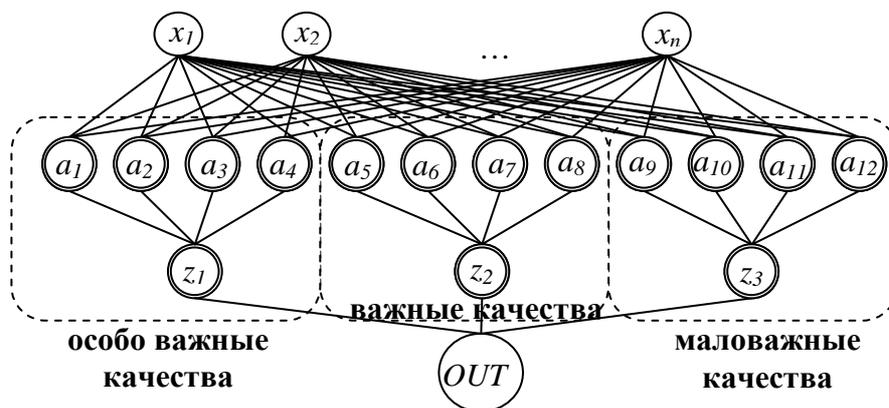


Рис. 1. Иерархическая система нечеткого логического вывода об уровне профпригодности оператора

Аналогичным образом формализуется описание отношений между ПВК и ПФ тестами, позволяющими оценить уровень сформированности ПВК посредством анализа измеренных значений ПФ параметров:  $a_i = f(x_1, \dots, x_n)$ , где  $(x_1, \dots, x_n)$  – результаты ПФ тестов.

Необходимость принятия решений на основе слабо формализованной и фрагментарной информации об операторской деятельности, знаний об операторских функциях и ПВК, устранения субъективности, минимизации затрат на оценку профпригодности обуславливает разработку системы поддержки принятия решений (СППР), обеспечивающей информационную при оценке профпригодности оператора ЭСУ и реализующую алгоритм нечеткого логического вывода, как показано на рис. 2.

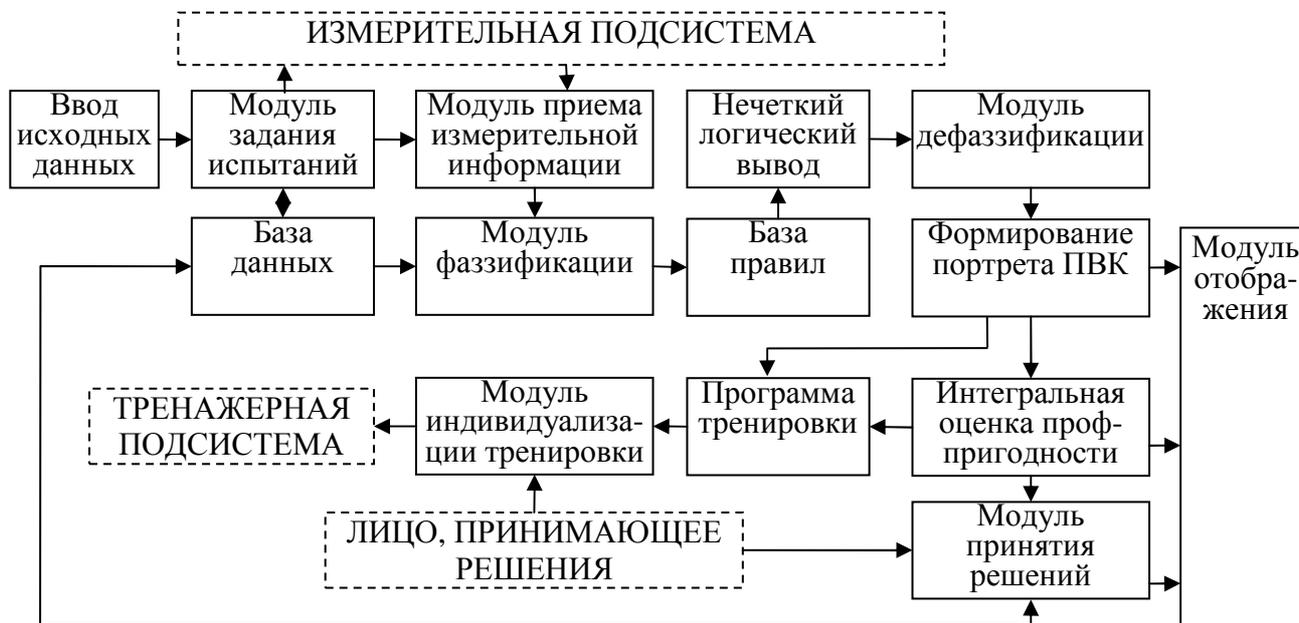


Рис. 2. Структура программного обеспечения СППР

Отличительной особенностью СППР в этом случае является наличие измерительной, информационной и тренажерной подсистем, обеспечивающих соответственно получение результатов ПФ тестирования, вынесение оценки

профпригодности и формирование индивидуальной программы тренировки на основе результатов тестирования для подготовки операторов.

Формирование базы правил для конкретного вида операторской деятельности осуществляется с использованием методов экспертной оценки для каждого конкретного случая, что позволяет транслировать представленную модель в общем виде на частные области операторского труда, и имеет вид:

$R_1: IF (x_1.IS.L_{11}).AND.(x_2.IS.L_{12}).AND. \dots .AND.(x_n.IS.L_{1n}), THEN a = B_1$

$R_i: IF (x_1.IS.L_{i1}).AND.(x_2.IS.L_{i2}).AND. \dots .AND.(x_n.IS.L_{in}), THEN a = B_i$

$R_m: IF (x_1.IS.L_{m1}).AND.(x_2.IS.L_{m2}).AND. \dots .AND.(x_n.IS.L_{mn}), THEN a = B_m$

где  $x_k$  – входные переменные;  $a$  – выходная переменная;  $L_{ik}$  – заданные нечеткие множества с функциями принадлежности.

Выходами СППР являются интегральная оценка профпригодности в диапазоне от 0 до 100 %, а также оценки уровня развитости отдельных ПВК, составляющих индивидуальный ПВК портрет оператора, являющийся основой для последующей тренировки оператора.

### **Заключение**

Таким образом, в работе разработана и формализована модель профпригодности оператора и процесса принятия решения по оценке профпригодности в классе иерархических систем на основе метода анализа иерархий, заключающаяся в выборе 12 наиболее значимых для данного вида операторской деятельности ПВК. На основе модели сформирована оценка профпригодности в виде функционала качества, разработана структура, определен состав СППР, обоснован и определен математический аппарат для ее реализации.

Приведенные в статье результаты получены в рамках выполнения государственного задания на НИР при поддержке гранта № 8.1287.2011 «Методическое, алгоритмическое и программно-техническое обеспечение исследования временных аспектов сенсорного восприятия человека-оператора».

### **Список литературы**

1. Tervo K., Palmroth L., Koivo H. Skill evaluation of human operators in partly automated mobile working machines // IEEE transactions on automation science and engineering. 2010. – Vol. 7, No. 1. – pp. 133-142.
2. Глебова Е.В. Снижение риска аварийности и травматизма в нефтегазовой промышленности на основе модели профессиональной пригодности операторов // Автореф. докт. техн. наук., Уфа. – 2008. – 46 с.
3. Петухов И.В. К вопросу обеспечения надежности эргатических систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. – № 1. (118). – С. 25–30.
4. Liu Y., Feyen R., Tsimhoni O. Queuing network-model human processor (QN-MHP): A computational architecture for multitask performance in human-machine systems // ACM Transactions on computer-human interaction. 2006. – Vol.13, No.1 – pp. 37–70.

## КОРПОРАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ, РАБОТАЮЩИМИ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ *IOS*

### Аннотация

В статье рассказывается о системах, позволяющих организации управлять мобильными устройствами, которые используются сотрудниками в рабочих целях. Показана актуальность таких систем, а также продемонстрированы возможности корпоративной настройки на примере устройств, работающих под управлением *iOS*.

### Введение

Современная жизнь ставит человеку жесткие требования: успевать всё и быть подвижным, мобильным. Поэтому неудивительно, что различные мобильные устройства, начиная от телефонов и смартфонов и заканчивая планшетниками, всё сильнее и сильнее начинают проникать как в обыденную, так и в профессиональную жизнь человека.

Действительно, мобильные устройства предоставляют множество преимуществ: они удобны, имеют небольшой размер, позволяют хранить большой объем данных, обеспечивают доступ к необходимой информации из любой точки планеты, а также зачастую мобильные устройства намного дешевле, чем ноутбуки или стационарные компьютеры.

Согласно недавнему исследованию, проведенному компанией *Aberdeen*, в августе 2012 года 18% компаний-респондентов уже в полной мере используют в своей деятельности мобильные устройства, а 41% компаний собираются задействовать их в течении 24 месяцев [1]. Необходимо признать, что хотя исследование и проводилось среди американских фирм, но, учитывая тенденцию нашей страны перенимать опыт с Запада, данная проблема в недалеком будущем станет актуальной и для нас.

В большинстве компаний применяется так называемая *BYOD (Bring Your Own Device)* модель, согласно которой сотрудники могут использовать для работы собственные мобильные устройства [2]. Не стоит и говорить, что при такой модели необходимость централизованного корпоративного управления мобильными устройствами только повышается.

Цель настоящей статьи описать основные возможности корпоративных систем управления мобильными устройствами на примере управления *iOS*-устройствами.

## **MDM-системы**

*Mobile Device Management* – это общее название систем, предназначенных для централизованного управления, мониторинга и защиты крупной инфраструктуры мобильных устройств.

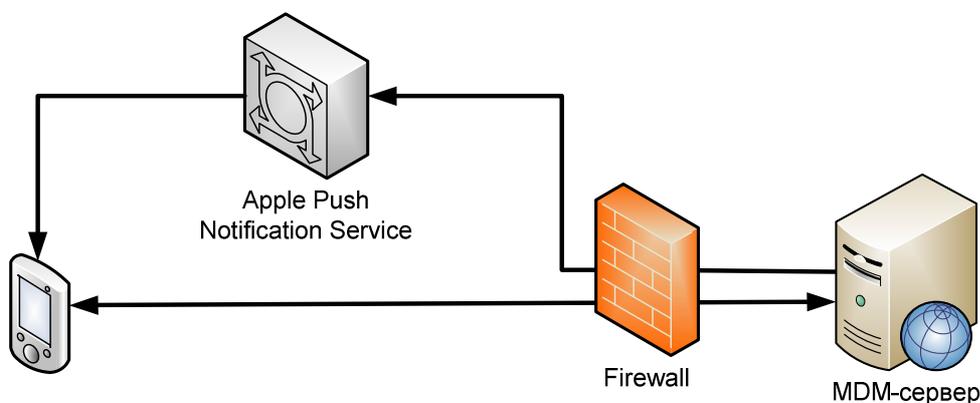
*MDM*-система, как правило, может быть развернута пятью разными способами [2]:

- *MDM* развернута внутри организации и управляется организацией;
- *MDM* развернута внутри организации, но управляется третьей стороной;
- *MDM* развернута на третьей стороне, но организацией может управлять системой удаленно;
- *MDM* развернута и управляется третьей стороной;
- *MDM* развернута в облаке и организация пользуется ей, как сервисом.

Среди крупных *MDM*-провайдеров можно выделить такие, как *MobileIron*, *AirWatch*, *Zenprise*, *Good Technology*.

*iOS* поддерживает *MDM*-решения, что позволяет администраторам предприятия легко регистрировать устройства с *iOS* в информационной инфраструктуре предприятия, удаленно конфигурировать и изменять настройки устройства, следить за исполнением корпоративных политик и даже удаленно блокировать или стирать данные с устройства.

Управление устройствами осуществляется *MDM*-сервером, причем в случае с *iOS* во взаимодействии также участвует *Apple Push Notification Service*. *Apple Push Notification Service* – это служба уведомлений Apple, работающая по технологии *push*; уведомления службы передаются по IP-каналу. Как уже говорилось выше, *MDM*-сервер может быть как корпоративным, так и принадлежать третьей стороне. Устройство периодически соединяется с *MDM*-сервером, чтобы проверить наличие ожидающих заданий и при необходимости выполняет их (например, получает файл конфигурации и применяет его). Причем всё взаимодействие с *MDM*-сервисом производится незаметно для пользователя [3]. Упрощенная схема взаимодействия устройства с *MDM*-сервером представлена на рисунке 1.



*Рис. 1. MDM-сервис*

Настройка устройств производится с помощью так называемых профилей. Каждый профиль это набор определенных настроек устройства, то есть у администратора нет необходимости настраивать каждое устройство по отдельности, достаточно лишь один раз создать профиль, а затем применить его к устройству или группе устройств.

Для управления устройствами, работающими под *iOS*, компания *Apple* выпустила специальную утилиту *Apple Configurator*. Утилита дает организации возможность массово настраивать приложения, параметры и политики безопасности *iOS*-устройств.

Рассмотрим поподробнее некоторые из настраиваемых параметров профиля [4].

- *General* – содержит общую информацию о профиле, такую как название, краткое описание, возможность удаления профиля пользователем и т.п.;

- *Passcode* – в данной опции устанавливаются требования к сложности пароля; период смены пароля; время, через которое устройство будет автоматически блокироваться; парольная история; количество неправильных попыток ввода пароля, после которых вся информация с устройства будет стёрта и т.п.

- *Restrictions* – в этом разделе администратор может ограничить функционал устройства (например, запретить/разрешить установку приложений, использование камеры); наложить ограничения на встроенные приложения *Youtube*, *iTunes Store*, *Safari*; настроить параметры облачного хранилища *iCloud*; сделать шифрование бэкапов принудительным и ограничить контент приложений, ТВ-передач и фильмов на основе системы рейтинга;

- *Wi-Fi* – здесь указывается к какой беспроводной сети следует подключаться устройству, можно выбрать тип шифрования и при необходимости настроить прокси;

- *VPN* – в настройках *VPN* указывается название соединения; тип соединения (*L2TP*, *PPTP*, *IPSec (Cisco)*, *Cisco AnyConnect*, *Juniper SSL*, *F5 SSL*, *SonicWALL Mobile Connect*, *Aruba VIA*, *Check Point Mobile VPN*, *Custom SSL*); аутентификационные данные пользователя и прокси при необходимости;

Помимо вышеперечисленного утилита дает возможность настроить учетную запись почты, календари, контакты, синхронизацию с *Microsoft Exchange* и со службой каталогов.

Еще одна особенность утилиты *Apple Configurator*, которую стоит отметить, это возможность перевода устройства в режим «*app lock*». В режиме «*app lock*» после загрузки операционной системы сразу же будет загружено определенное приложение, и пользователь никак не сможет выйти из него; так что, по сути, устройство превратится в платформу для единственного приложения.

Еще стоит добавить, что устройства могут управляться в двух режимах: контролируемом (*supervised*) и неконтролируемом (*unsupervised*).

При неконтролируемом режиме новый профиль перекрывает существующий пользовательский профиль на определенный промежуток времени, по истечении которого автоматически сбрасывается.

В контролируемом режиме администраторы имеют больше контроля над настройками устройства. Контролируемый режим позволяет предотвратить из-

менение пользователем некоторых или всех настроек, выборочно отключать функции устройства, ограничивать контент, который пользователь может скачивать или просматривать. Некоторые из вышеперечисленных параметров профиля можно настроить только в контролируемом режиме.

### **Заключение**

Итак, управление мобильными устройствами в корпоративной среде из года в год становится все более актуальной проблемой на Западе. Можно с высокой долей вероятности утверждать, что в скором времени с этой проблемой столкнутся и российские компании.

Тем не менее, уже существуют специальные сервисы или системы, которые в достаточной мере помогают организациям решить задачу управления мобильными устройствами. На примере устройств, работающих под операционной системой *iOS*, было показано, как можно осуществлять гибкую настройку корпоративных мобильных устройств, обеспечивающую организации должный уровень управления, безопасности и мониторинга.

### **Список литературы**

1. Next-Generation Enterprise Mobility: Putting Mobile to Work / Aberdeen Group [Электронный ресурс]. URL:

<http://v1.aberdeen.com/launch/report/perspective/8208-AI-enterprise-mobility-management.asp?lan=US> (дата обращения 02.03.13)

2. Guide to iPad Security & MDM in the Enterprise / eSecurity Planet [Электронный ресурс]. URL: <http://www.esecurityplanet.com/mobile-security/guide-to-ipad-security-in-the-enterprise-1.html> (дата обращения 02.03.13)

3. Deploying iPhone and iPad Mobile Device Management [Электронный ресурс] URL: [http://images.apple.com/iphone/business/docs/iOS\\_MDM\\_Mar12.pdf](http://images.apple.com/iphone/business/docs/iOS_MDM_Mar12.pdf) (дата обращения 02.03.13)

4. Apple Configurator Help [Электронный ресурс]. URL:<http://help.apple.com/configurator/mac/1.2/> (дата обращения 02.03.13)

## **НЕЙРОННАЯ СЕТЬ В СТРУКТУРЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

### **Аннотация**

Рассматривается самомаршрутизирующийся аналого-цифровой преобразователь на основе нейронной сети. Приводится структурная схема нейронной сети с описанием элементов отдельных слоев. Раскрывается принцип самомаршрутизации и обсуждаются проблемы обеспечения отказоустойчивости отдельных элементов.

Во многих современных системах управления используются данные, получаемые с различных датчиков, особенно это актуально для автоматизированных систем различных производств. Для обработки информации поступающей с датчиков необходимо осуществить аналого-цифровое преобразование. Несмотря на наличие множества решения этой задачи [1] в настоящее время остаются актуальными следующие проблемы: повышение точности, надежности и отказоустойчивости аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а также уменьшение ресурсоемкости [2]. Одной из возможностей разрешения этих проблем является создание самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети [3], такой преобразователь позволит значительно снизить ресурсоемкость преобразователя, при этом обеспечив заданную отказоустойчивость.

На общей структурной схеме преобразователя (рис.1) выделены непосредственно нейронная сеть, а также блок компараторов и схема вычисления требуемой разрядности индивидуального АЦП по каждому входному сигналу. Блок компараторов отвечает за то чтобы сравнивать входные аналоговые сигналы с уравнивающими напряжениями, которые генерируются нейронной сетью после образования в ней отдельного индивидуального АЦП для данного входного сигнала. Схема вычисления требуемой разрядности определяет длину образуемого индивидуального АЦП в зависимости от заданной точности измерения конкретного входного сигнала и от частоты его изменения. Как видно из схемы входные аналоговые сигналы не попадают на нейронную сеть (НС), преобразуясь в цифровую информацию. Это позволяет избежать влияния помех и различных скачков напряжения во входных каналах на НС. Но тем не менее это не избавляет НС от работы с аналоговой составляющей, так как именно НС создает уравнивающее напряжение для корректной работы блока компараторов.

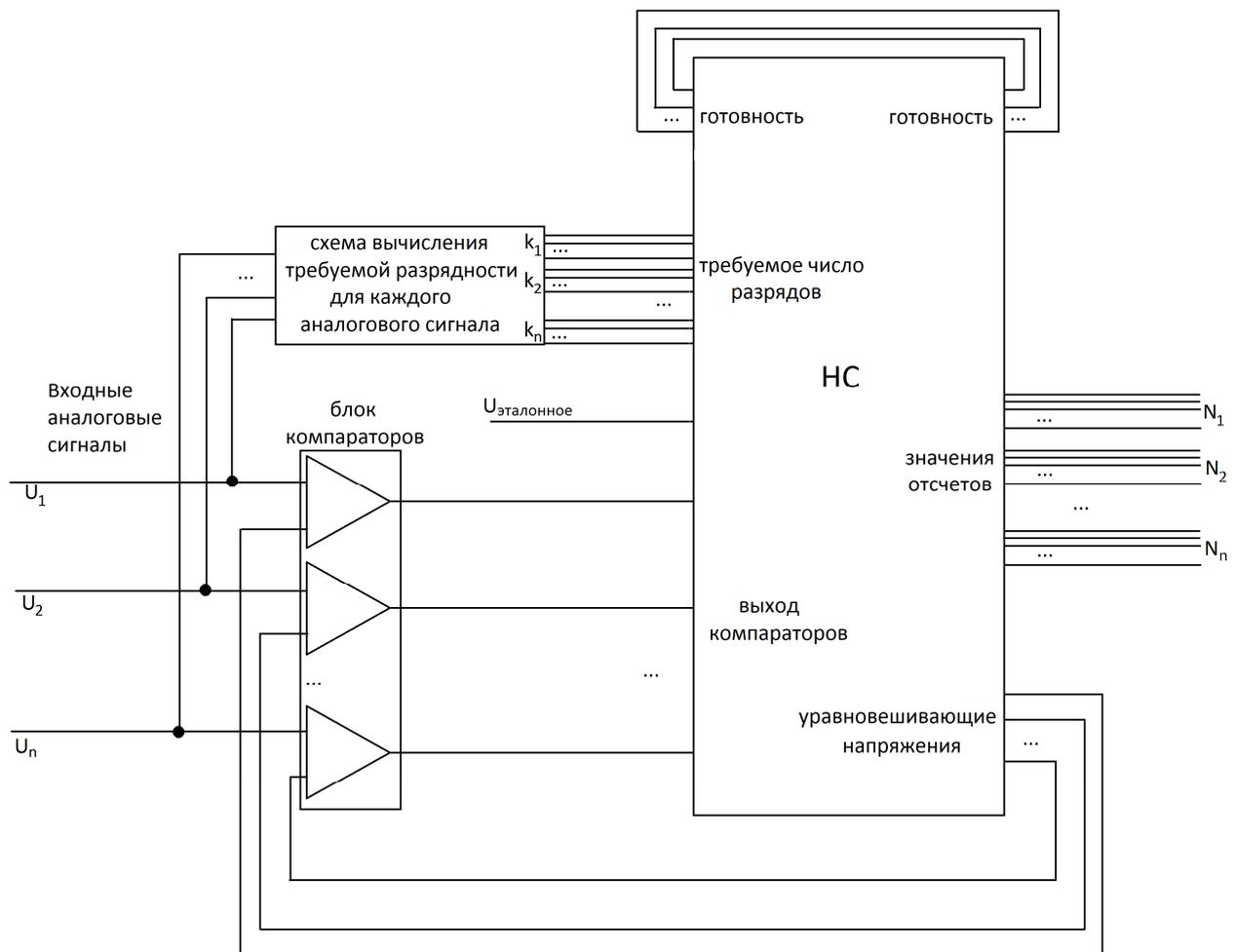


Рис. 1. Структурная схема самомаршрутизирующегося АЦП НС

Таким образом, разработка самомаршрутизирующегося АЦП НС включает две главные задачи: разработка цифровой части, которая по большей части отвечает за маршрутизацию сигналов, и разработка аналоговой части, которая отвечает непосредственно за проведение преобразования [3].

Аналоговая часть на данном этапе разработки представляет собой матрицу  $R-2R$ , разделенную между нейронами, которые, по сути, представляют собой одноразрядные АЦП. Тогда при объединении определенного количества нейронов можно получить индивидуальный АЦП любой длины, ограниченной лишь условными пределами, которые задаются при создании устройства. Для объединения нейронов необходимо предусмотреть систему служебных сигналов, кроме того, нейроны расположены таким образом, что каждый из них может стать первым в формируемом индивидуальном АЦП. Эту задачу решает цифровая часть схемы, которая собирает информацию о состоянии нейронов, с помощью нее осуществляет самомаршрутизацию сигналов к свободной части НС, а также обеспечивает направление результатов работы индивидуального АЦП к соответствующему выходу НС.

Рассмотрим структурную схему нейронной сети (рис. 2). На ней выделены 3 основных слоя нейронов, каждый из которых состоит из однотипных унифицированных нейронов. Слой коммутаторов соединяет входной слой со слоем

основных нейронов, реализуя самомаршрутизацию сигналов; слой основных нейронов, которые отвечают за проведение аналого-цифрового преобразователя; слой концентраторов собирающий выходную информацию со слоя основных нейронов и направляет на соответствующий выход НС.

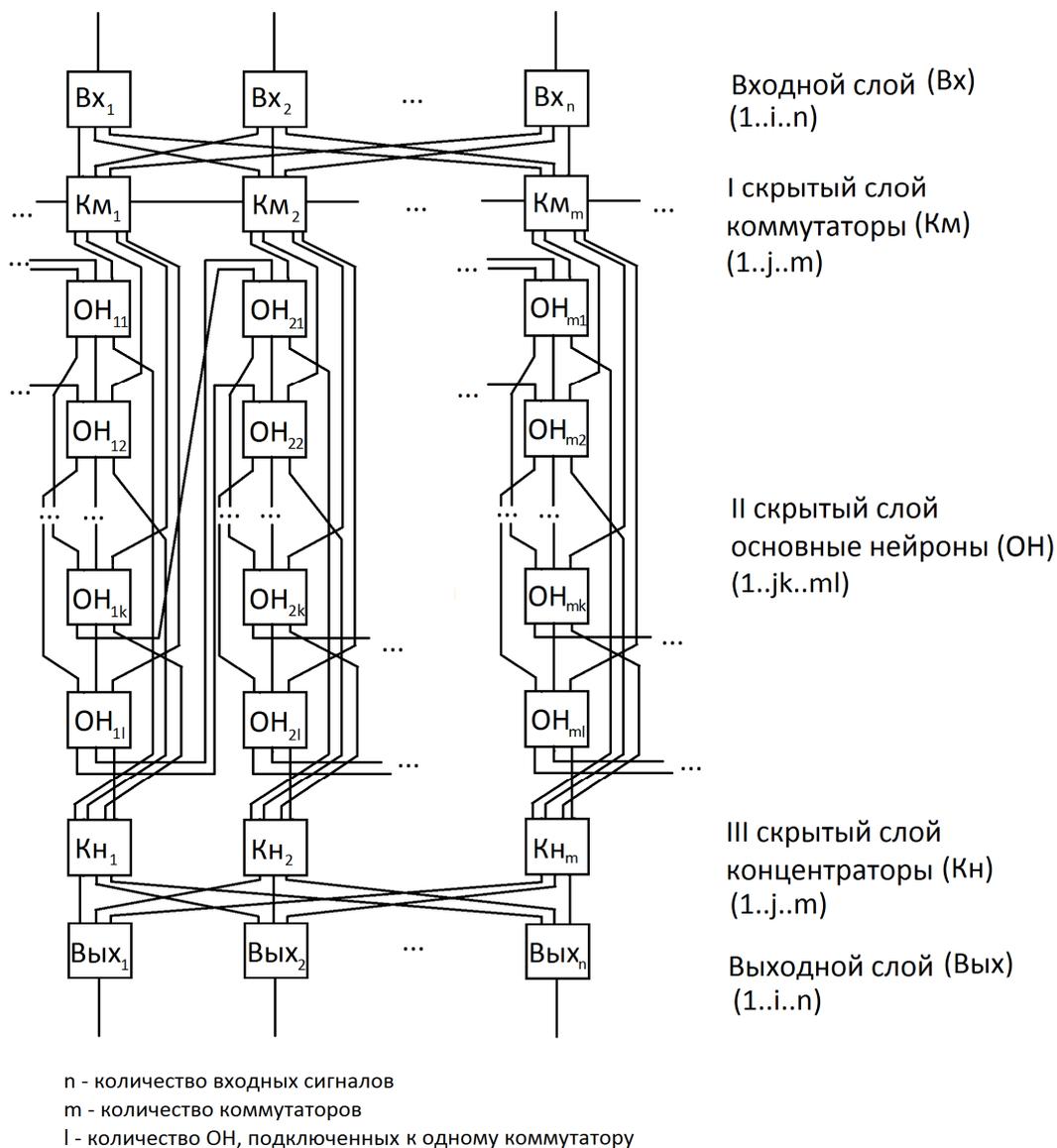


Рис. 2. Структурная схема нейронной сети

Работа АЦП НС подразделяется на три основных этапа. Первый этап – формирование индивидуального АЦП. После поступления входного аналогового сигнала схема подсчета требуемой разрядности сообщает НС число разрядов в формируемом индивидуальном АЦП, которое поступает на свободные коммутаторы, где принимается решение какие из основных нейронов возможно объединить под данный индивидуальный АЦП. Затем с помощью служебных флагов коммутаторы сообщают нейронам о том, что они присоединены к индивидуальному АЦП. Завершает этот этап передача соответствующего флага на концентратор, который сгенерирует сигнал готовности, показывающий, что можно переходить к следующему этапу.

Второй этап – проведение аналого-цифрового преобразования. После появления сигнала готовности начинает работать сформированная на первом этапе матрица  $R-2R$ . Аналого-цифровое преобразование проводится с помощью метода поразрядного взвешивания, когда очередной разряд, начиная со старшего, сперва, выставляется в 1. Затем проверяется значение с выхода компаратора, если уравнивающее напряжение не превышает напряжение входного сигнала, то разряд остается в 1, иначе возвращается в 0. Полученное значение разряда передается от нейрона к нейрону, в итоге накапливаясь в выходном нейроне, откуда будет передано на микроконтроллер, когда будет окончательно сформировано значение отсчета.

Третий этап – разрушение индивидуального АЦП. После обработки входного сигнала необходимо «разрушить» сформированный индивидуальный АЦП, чтобы перевести все задействованные нейроны в исходное состояние.

Достоинствами данной схемы являются снижение аппаратных затрат за счет возможности реализации индивидуальных АЦП требуемой разрядности для каждого из входов схемы, а также возможность обеспечения отказоустойчивости элементов схемы. Отказоустойчивость основных нейронов обеспечивается наличием связей не только со следующим нейроном, но и «через один», «через два» и т.д. в зависимости от того, на сколько отказов должна быть рассчитана схема.

Основные проблемы, требующие решения: обеспечение отказоустойчивости коммутаторов и концентраторов, при чем в настоящее время идет разработка двухслойной схемы, из которой исключены концентраторы. Также требуется проработка аналоговой части схемы для корректного распределения «веса» каждого разряда между нейронами. Кроме того, необходимо перейти к непосредственной реализации законченных алгоритмов для подтверждения теоретических разработок на практике.

### Список литературы

1. Матушкин Н.Н., Южаков А.А. Измерительные преобразователи на основе потоковой динамической архитектуры // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1994. №1. С.16-21
2. Цифровые адаптивные информационно-измерительные системы / Авдеев Б.Я., Белоусов В.В. и др.; под ред. Авдеева Б.Я. и Чернявского Е.А. – СПб.: Энергоатомиздат, 1997
3. Посягин А.И., Южаков А.А. Разработка аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети // Электротехника. 2011. №11. С.18-24

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ТОВАРНО-СЫРЬЕВОГО ПАРКА НПЗ**

### **Аннотация**

Рассматривается постановка задачи календарного планирования работы НПЗ. Предлагается имитационный подход к решению задачи и его реализация – имитационная модель календарного планирования работы товарно-сырьевого парка НПЗ. Описывается его структура и данные, необходимые для решения задачи календарного планирования.

### **Введение**

Планирование производства на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) в настоящее время происходит на двух уровнях: уровень текущего планирования и уровень календарного планирования (КП). Под задачей текущего планирования понимается составление объемного плана производства на период от нескольких месяцев до нескольких недель, и для ее решения активно используются системы моделирования и коммерческие продукты. В свою очередь, для решения задачи КП — составления посуточного расписания работ отдельных цехов завода на неделю или декаду, завод вынужден составлять календарный план вручную, затрачивая большое количество временных ресурсов.

Под задачей КП производства понимается нахождение последовательности технологических операций на сутки, когда работа установок и резервуаров увязана с поставкой и переработкой определенного типа сырья и отгрузкой необходимого вида готовой продукции и, соответственно, требуемыми перекачками материальных потоков [1].

Исходной информацией для задачи является план производства на период (месяц, неделя, декада), полученный при решении задачи текущего планирования, а также данные о фактических запасах в резервуарах и режимах работы установок на момент составления календарного плана.

### **Имитационный подход к решению задачи КП**

Имитационное моделирование включает в себя разбиение рассматриваемой системы на компоненты, отображающие работу реальных установок, их описание в виде совокупности переменных, параметров, ограничений и функциональных зависимостей, и дальнейшее проигрывание этой модели во времени, с целью найти всю совокупность управляющих переменных для каждого дня планирования, которая будет обеспечивать функционирование системы. Такая модель должна позволять по исходным данным и фактическим показателям параметров системы отобразить реальные

явления в системе и получить сведения о возможном поведении для данной конкретной ситуации.

В общем виде имитационную модель можно описать следующим уравнением:

$$U=f(x,p) \quad (1)$$

где  $U$  – состояние моделируемой системы,  $f$  – функциональные зависимости,  $x$  – переменные модели,  $p$  – параметры модели.

Управляющие переменные модели представляют собой те величины, при изменении которых система изменяет свое состояние. Параметры имитационной модели - это фиксированные значения, такие как максимальный и минимальный возможные уровни в резервуаре, либо вычисляемые данные, которые являлись переменными другой подмодели. Функциональной зависимостью переменных и параметров определяются подмодели, а имитационная модель производства определяется совокупностью взаимодействующих подмоделей [2].

Для задачи календарного планирования, в которой переменные и параметры модели зависят от времени, уравнение (1) выглядит следующим образом:

$$U[t]=f(x[t],p[t]). \quad (2)$$

С помощью параметров моделируются ограничения задачи календарного планирования. Например, если значение переменной, определяющей запас материала в резервуаре, в определенный момент времени будет больше, чем значение параметра, определяющего емкость резервуара, то состояние системы является недопустимым. Еще один пример реализации ограничения в задаче КП при имитационном моделировании - заявка на отгрузку готовой продукции. В этом случае, если набор переменных таков, что отгружается продукции меньше или больше, чем необходимо, то набор управляющих переменных подлежит пересмотру.

Искомым состоянием системы при имитационном подходе к КП является такой набор значений переменных, который в каждый момент времени не нарушает заданные ограничения модели.

### **Описание товарно-сырьевого парка НПЗ**

Хотя имитационный подход к задаче построения календарного плана производства может быть осуществлен для всего НПЗ в целом, в данной работе рассматривается только часть цепочки производства, а именно товарно-сырьевой парк (ТСП). В ТСП непрерывно поступают нефтепродукты с заданными скоростями или с заданным графиком производства с установок НПЗ (Рис. 1). Продукты могут храниться либо в любых резервуарах, либо в определенной группе резервуаров, в зависимости от структуры завода. После заполнения резервуара готовый продукт поступает на одну из линий отгрузки, таких как отгрузка автотранспортом, железной дорогой или по трубе. Причем ТСП может содержать несколько линий отгрузки одного типа: ж/д налив светлых нефтепродуктов и ж/д налив темных нефтепродуктов.

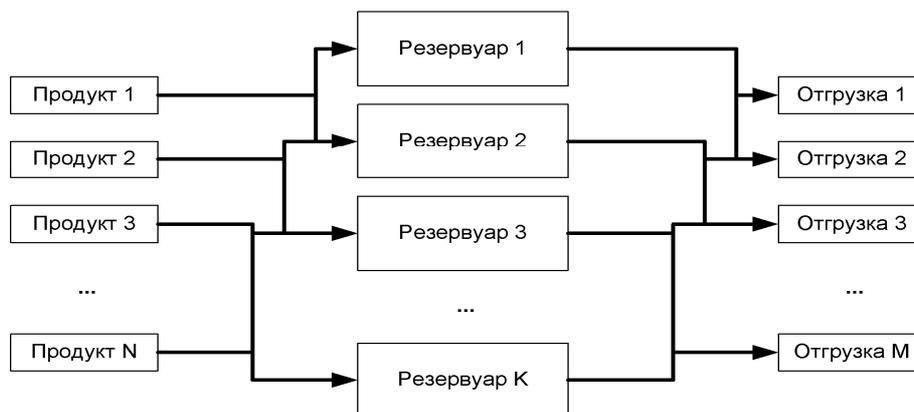


Рис. 1. Схема товарно-сырьевого парка НПЗ

Перед началом планирования работы ТСП известными считаются следующие данные. Технологические ограничения: структурно-поточковая схема ТСП; группировка продуктов по резервуарам; максимальный объем резервуаров и мертвые остатки; производительность линий отгрузки. Плановые данные: остатки продуктов в резервуарах на начало планирования; скорость поступления продуктов в ТСП или график производства; график отгрузки нефтепродуктов.

Для решения задачи КП необходимо определить перемещения продуктов от установок (с точек входа в ТСП) к резервуарам и от резервуаров на линии отгрузки по дням так, чтобы не нарушались технологические ограничения, и выполнялся график отгрузки нефтепродуктов.

### Имитационная модель ТСП

Имитационная модель ТСП состоит из компонентов, отражающих реальную работу резервуаров и линий отгрузки готовой продукции. Для описания каждого такого компонента требуется определенный набор параметров, значения которых должны быть известны к началу работы по составлению расписания, и могут быть получены либо после решения задачи КП по смешению продуктов НПЗ, либо из фактических данных. Например, для описания работы одного резервуара ( $Pool1$ ) понадобятся следующие параметры:

$Blend1_{Td}, Blend2_{Td}, \dots, BlendN_{Td}$  - количество тонн продуктов  $Blend1, Blend2, \dots, BlendN$ , которые могут храниться в резервуаре  $Pool1$ , поступающих в день в товарно-сырьевой парк НПЗ.  $Pool1_{Max}, Pool1_{Min}$  — максимальный и минимальный возможные уровни в резервуаре.

$Blend1_{Ship1}, Blend1_{Ship2}, \dots, Blend1_{ShipM}, \dots, BlendN_{ShipM}$  — заявки на отгрузку продуктов  $Blend1, \dots, BlendN$ , в тоннах в день. Здесь  $Ship1, \dots, ShipM$  — различные виды отгрузки.

Среди переменных модели, описывающих работу этого резервуара, необходимо выделить следующие:

$Blend1_{Pool1}, Blend2_{Pool1}, \dots, BlendN_{Pool1}$  — количество тонн от потока продукта, поступающего в день в ТСП, которая должна быть отправлена на

хранение в резервуар Pool1. В каждый из дней планирования только одна из этих переменных может быть ненулевой.

$Pool1_{Ship1}^{Blend1}, \dots, Pool1_{ShipM}^{Blend1}, \dots, Pool1_{Ship1}^{BlendN}, \dots, Pool1_{ShipM}^{BlendN}$  — количество тонн продукта, хранящегося в резервуаре, которое должно быть отправлено в этот день на отгрузку.  $Pool1_{Cap}$  — текущий уровень в резервуаре.

Вышеперечисленные переменные связаны следующей зависимостью:

$$Pool1_{Cap} = Pool1_{Cap}(-1) + Blend1_{Pool1} + \dots + BlendN_{Pool1} - Pool1_{Ship1} - \dots - Pool1_{ShipM}, \quad (3)$$

где  $Pool1_{Cap}(-1)$  — уровень в резервуаре в предыдущий день планирования.

Необходимо определить значения переменных  $Blend1_{Pool1}, Blend2_{Pool1}, \dots, BlendN_{Pool1}$  и  $Pool1_{Ship1}, Pool1_{Ship2}, \dots, Pool1_{ShipM}$  для каждого дня планирования, таким образом, чтобы выполнялись следующие условия:

$$Blend1_{Td} = Blend1_{Pool1} + Blend1_{Pool2} + \dots + Blend1_{PoolK}, \quad (4)$$

$$\dots$$

$$BlendN_{Td} = BlendN_{Pool1} + BlendN_{Pool2} + \dots + BlendN_{PoolK}, \quad (5)$$

$$Blend1_{Ship1} = Pool1_{Ship1}^{Blend1} + Pool2_{Ship1}^{Blend1} + \dots + PoolK_{Ship1}^{Blend1}, \quad (6)$$

$$\dots$$

$$BlendN_{Ship1} = Pool1_{Ship1}^{BlendN} + Pool2_{Ship1}^{BlendN} + \dots + PoolK_{Ship1}^{BlendN}, \quad (7)$$

$$Pool1_{Cap} \leq Pool1_{Max}, \quad Pool1_{Cap} \geq Pool1_{Min}, \quad (8)$$

т.е. все потоки готовой продукции, поступающей в ТСП в день, должны быть распределены между товарными резервуарами, и заявки на отгрузку продукции должны быть выполнены.

## Результаты

В работе сформулирована задача календарного планирования работы товарно-сырьевого парка НПЗ. С использованием имитационной модели, описанной в работе, была решена поставленная задача календарного планирования. Проведены вычислительные эксперименты с моделью, подтверждающие ее эффективность по сравнению с неавтоматизированными способами планирования.

## Список литературы

1. Дудников Е.Е., Цодиков Ю.М. Типовые задачи оперативного управления непрерывным производством – М.: Энергия, 1979. – 272 с.
2. Имитационные модели в комплексе календарного планирования производства НПЗ / Шайдуллин Р.А., Хохлов А.С., Проказина М.В. // Автоматизация в промышленности. 2012. №10. С. 15-21.

## РОБАСТНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

### Аннотация

Предложена методика оценки робастной устойчивости многосвязной системы автоматического управления (МСАУ) для случая, когда подсистемы и связи между ними содержат неопределенности. Используется системная форма описания МСАУ на уровне характеристик подсистем и характеристик связи.

### Введение

Многие современные подходы исследуют робастную устойчивость систем в условиях неопределенности [1, 2, 5]. Эти подходы, прежде всего, учитывают тот факт, что реальные физические системы и окружающие условия, в которых они работают, не могут быть смоделированы абсолютно точно по ряду причин:

- изменение параметров в силу тех или иных обстоятельств;
- наличие динамических свойств, не учтенных в модели (малые параметры);
- не учтенное запаздывание по времени;
- изменение положения рабочей точки (положения равновесия);
- непредсказуемые внешние возмущения.

Предлагаемая ниже методика позволяет оценить робастную устойчивость МСАУ, основанную на описании МСАУ на уровне локальных характеристик сепаратных подсистем и многомерных элементов связи между ними, использовании частотных критериев устойчивости [3] и теоремы Харитоновой [4].

### Постановка задачи

Рассмотрим МСАУ, состоящую из множества идентичных сепаратных подсистем с перекрестными связями через многомерный объект управления.

Согласно описанию многосвязной САУ на уровне локальных характеристик сепаратных подсистем и многомерных элементов связи между ними [3] характеристическое уравнение имеет вид:

$$D(\Phi, H) = 1 + h_2(s)\Phi^2(s) + h_3(s)\Phi^3(s) + \dots + h_n(s)\Phi^n(s) = 0, \quad (1)$$

где  $\Phi(s)$  индивидуальная характеристика подсистемы,  $h_i$ ,  $i = \overline{2, n}$ , обобщенные характеристики связи. Введем независимую комплексную переменную  $x$  и, заменив в (1)  $\Phi(s) = x$ , получим уравнение связи

$$D(x, h) = 1 + h_2x^2 + \dots + h_nx^n = 0 \quad (2)$$

Значения параметров  $\Phi(s)$  и  $h_i$  находятся в некотором диапазоне.

## Методика оценки робастной устойчивости многосвязной системы автоматического управления

Случай 1. Пусть известно, что коэффициенты характеристического уравнения связи находятся в интервалах

$$\alpha_i \leq h_i \leq \beta_i, \text{ где } i=2, \dots, n,$$

а передаточная функция сепаратных подсистем  $\Phi(s)$  имеет постоянные параметры.

Чтобы исследовать устойчивость такой системы, нужно было бы перебрать все возможные сочетания параметров  $h_i$ . Но, теорема Харитонова утверждает [4], что задачу можно свести к исследованию ограниченного числа полиномов наихудшего вида. Система такого вида будет робастно устойчива тогда и только тогда, когда будут устойчивы четыре харитоновских полинома, составленные для характеристического уравнения связи (2)

$$\begin{aligned} D_1(h,x) &= 1 + \alpha_2 x^2(s) + \alpha_3 x^3(s) + \beta_4 x^4(s) + \beta_5 x^5(s) + \dots, \\ D_2(h,x) &= 1 + \beta_2 x^2(s) + \alpha_3 x^3(s) + \alpha_4 x^4(s) + \beta_5 x^5(s) + \dots, \\ D_3(h,x) &= 1 + \beta_2 x^2(s) + \beta_3 x^3(s) + \alpha_4 x^4(s) + \alpha_5 x^5(s) + \dots, \\ D_4(h,x) &= 1 + \alpha_2 x^2(s) + \beta_3 x^3(s) + \beta_4 x^4(s) + \alpha_5 x^5(s) + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Устойчивость каждого полинома определяется с помощью частотного критерия, разработанного в работе [3].

Таким образом, ни один из корней  $x_{ik}$ , где  $i=1, \dots, n$  и  $k=1, \dots, 4$ , ни одного из четырех характеристических уравнений связи не должен охватываться годографом АФХ  $\Phi(s)$  сепаратной подсистемы.

Случай 2. Рассмотрим однотипную МСАУ, где характеристики связей  $h_i$  являются постоянными величинами, а значения параметров сепаратных подсистем  $\Phi(s)$  изменяются в некотором диапазоне.

Пусть передаточная функция сепаратной подсистемы имеет вид

$$\Phi(s) = \frac{1}{d_m s^m + d_{m-1} s^{m-1} + \dots + d_1 s + 1},$$

а его характеристическое уравнение

$$Q(s) = 1 + d_1 s + d_2 s^2 + \dots + d_m s^m, \quad \gamma_i \leq d_i \leq \delta_i, \text{ где } i=1, \dots, m.$$

Такая система будет робастно устойчива тогда, когда ни один из четырех годографов АФХ  $\Phi_k(j\omega)$ ,  $k=1, \dots, 4$ , сепаратных подсистем, соответствующих четырем харитоновским полиномам

$$\begin{aligned} Q_1(s) &= 1 + \gamma_1 s + \gamma_2 s^2 + \delta_3 s^3 + \delta_4 s^4 + \dots, \\ Q_2(s) &= 1 + \delta_1 s + \gamma_2 s^2 + \gamma_3 s^3 + \delta_4 s^4 + \dots, \\ Q_3(s) &= 1 + \delta_1 s + \delta_2 s^2 + \gamma_3 s^3 + \gamma_4 s^4 + \dots, \\ Q_4(s) &= 1 + \gamma_1 s + \delta_2 s^2 + \delta_3 s^3 + \gamma_4 s^4 + \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

не будут охватывать ни один из корней характеристического уравнения связи (2).

Случай 3. Все сказанное выше позволяет сделать вывод, что если в однотипной МСАУ параметры характеристик связей  $h_i$  и сепаратных подсистем  $\Phi(s)$  находятся в некотором диапазоне, то робастная устойчивость системы определяется путем построения на одной комплексной плоскости всех корней  $x_{ik}$ , характеристических полиномов  $D_k(h,x)$ ,  $k=1,\dots,4$ , (3) и всех годографов АФХ  $\Phi_k(j\omega)$ ,  $k=1,\dots,4$ , сепаратных подсистем, соответствующих характеристическим полиномам подсистем  $Q_k(s)$ ,  $k=1,\dots,4$ , (4).

Таким образом, ни один из корней  $x_{ik}$ , где  $i=1,\dots,n$  и  $k=1,\dots,4$ , ни одного из четырех характеристических уравнений связей не должен охватываться ни одним из четырех годографов АФХ  $\Phi_k(j\omega)$ ,  $k=1,\dots,4$ , сепаратных подсистем. Только в этом случае однотипная МСАУ будет робастно устойчивой.

Случай 4. В этом случае рассмотрим однотипную МСАУ, где характеристики связей  $h_i$  являются постоянными величинами (2), значения параметров линейной части сепаратных подсистем  $\Phi(s)$  изменяются в некотором диапазоне и в каждой подсистеме имеются идентичные нелинейности.

Пусть передаточная функция гармонически линеаризованной сепаратной подсистемы имеет вид

$$\Phi(s,a) = \frac{N(a)}{d_m s^m + d_{m-1} s^{m-1} + \dots + d_1 s + N(a)},$$

где  $N(a) = q(a) + jq'(a)$  - коэффициент передачи гармонически линеаризованного нелинейного элемента сепаратной подсистемы. Характеристическое уравнение подсистемы

$$Q(s,a) = N(a) + d_1 s + d_2 s^2 + \dots + d_m s^m, \quad \gamma_i \leq d_i \leq \delta_i, \text{ где } i=1,\dots,m.$$

Образует следующие четыре харитоновских полинома

$$\begin{aligned} Q_1(s,a) &= N(a) + \gamma_1 s + \gamma_2 s^2 + \delta_3 s^3 + \delta_4 s^4 + \dots, \\ Q_2(s,a) &= N(a) + \delta_1 s + \gamma_2 s^2 + \gamma_3 s^3 + \delta_4 s^4 + \dots, \\ Q_3(s,a) &= N(a) + \delta_1 s + \delta_2 s^2 + \gamma_3 s^3 + \gamma_4 s^4 + \dots, \\ Q_4(s,a) &= N(a) + \gamma_1 s + \delta_2 s^2 + \delta_3 s^3 + \gamma_4 s^4 + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

На комплексной плоскости строим АФХ  $\Phi_{ik}(j\omega,a)$ ,  $k=1,\dots,4$ ,  $\omega \in (0,+\infty)$ ,  $a \in (0,+\infty)$ , сепаратных подсистем соответствующих характеристическим полиномам  $Q_k(s,a)$ ,  $k=1,\dots,4$ . На этой же плоскости располагаем корни характеристического уравнения связи  $x_i$ .

По частотному критерию система будет робастно устойчива, если ни один из годографов АФХ  $\Phi_{ik}(j\omega,a)$ ,  $k=1,\dots,4$ ,  $\omega \in (0,+\infty)$ ,  $a \in (0,+\infty)$ , сепаратных подсистем, соответствующих характеристическим полиномам подсистем  $Q_k(s,a)$ ,  $k=1,\dots,4$ , не охватывает ни один из корней  $x_i$ , где  $i=1,\dots,n$ , характеристического уравнения связи.

Если годографы АФХ  $\Phi_{ik}(j\omega,a)$ ,  $k=1,\dots,4$ ,  $\omega \in (0,+\infty)$ ,  $a \in (0,+\infty)$ , сепаратных подсистем и корни характеристического уравнения связи  $x_i$  пересекаются, то в системе присутствуют периодические движения параметры которых, амплитуда  $q^*$  и частота  $\omega^*$ , находятся в диапазоне

$$\begin{aligned} \min \{ a_{i1}^*, \dots, a_{ik}^* \} \leq a_i^* \leq \max \{ a_{i1}^*, \dots, a_{ik}^* \}, \\ \min \{ \omega_{i1}^*, \dots, \omega_{ik}^* \} \leq \omega_i^* \leq \max \{ \omega_{i1}^*, \dots, \omega_{ik}^* \} \quad k=1, \dots, 4. \end{aligned} \quad (6)$$

### **Заключение**

Таким образом, на основе системного описания многосвязной САУ через характеристики подсистем и характеристики связей предложена методика оценки робастной устойчивости исследуемых однотипных многосвязных систем. Методика также позволяет просто и удобно оперировать отдельно с характеристическими уравнениями подсистем  $\Phi(s)$  и характеристическими уравнениями связей  $D(h,x)$ , а не с характеристическим уравнением системы в целом  $D(h,\Phi)$  и позволяет указать какой из вариантов (четырёх полиномов) представляет наихудший случай.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 11-08-97063-р\_поволжье\_а, № 11-08-00871-а, № 12-08-01014-а).

### **Список литературы**

1. Воронов В.С. Показатели устойчивости и качества робастных систем управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1995. № 6.
2. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Устойчивость и робастная устойчивость однотипных систем. // Автоматика и телемеханика. 1996. - №11.- С. 91-104.
3. Ильясов Б.Г., Кабальнов Ю.С. Исследование устойчивости однотипных многосвязных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами. // Автоматика и телемеханика. – М., РАН, 1995, № 8. – С. 82-90.
4. Харитонов В.Л. Об асимптотической устойчивости положения равновесия семейства систем линейных дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения. 1978. -Т.14.- № 11. с. 2086-2088.
5. Паршева Е.А. Робастное децентрализованное управление с компенсацией возмущений нелинейными многосвязными объектами/ Паршева Е.А., Лежнина Ю.А. // Мехатроника, автоматизация, управление.– 2011.– №6. С. 2-7.

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШТАМПОВ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ**

В настоящее время проектирование штампа является весьма нетривиальной задачей, поскольку до сих пор не выработан четкий алгоритм, следуя которому можно из трехмерной модели детали получить сначала модель поковки. А потом уже и модели ручьев штампа. Чаще всего конструкторы при проектировании пользуются методом аналогии: необходимую штамповку сравнивают с уже производимыми.

Первая и пока единственная удачная попытка хоть как-то структурировать накопленный опыт и построить на его основе общие методические рекомендации была предпринята в 40х годах XX века в работе [1]

В основе методики лежат классификация поковок и классификация ручьев штампа. В качестве основного классификационного признака поковок используется форма поковки, по которой они разделены на следующие группы:

- Поковки с вытянутой осью - это поковки с прямой линией разъема, имеющие главную ось симметрии в виде прямой линии.

- Поковки с изогнутой осью. К данной группе относят поковки, у которых главная ось или (и) линия разъема представляют собой кривые, либо ломанные линии.

- Поковки с отростками. Классификационным признаком данной группы являются ярко выраженные выступы, резко направленные к основному элементу конфигурации.

- Поковки с извилинами. Группа близка к вышеописанной с той лишь разницей, что в поковке нельзя определить основной элемент конфигурации и выступ, они сравнимы в размерах.

- Поковки круглой или квадратной формы в плане (осесимметричные поковки) или приближающиеся к ним. Характерной особенностью данной группы является то, что размеры поковок в плане по взаимно перпендикулярным направлениям примерно равны.

- Поковки комбинированной конфигурации. К данному типу можно отнести поковки, которые можно охарактеризовать как совокупность отдельных элементов, каждый из которых представляет собой отчетливо выраженную форму, относящуюся к одной из 5 ранее описанных групп.

Для получения штамповки нужной конфигурации применяются окончательный, предварительный и предварительно-заготовительный типы штамповочных ручьев. Окончательный ручей представляет собой точный оттиск чертежа поковки. Размеры окончательного ручья выполняются по размерам чертежа поковки с учетом усадки металла при остывании.

Предварительный необходим для повышения стойкости окончательного

ручья, так как значительная часть формоизменения происходит именно в нем. Предварительно-заготовительный ручей применяется в случае неравномерного поперечного сечения поковки по её длине, в особенности когда разница между сечениями значительна.

На основе этих классификаций в [1] предложены несколько эмпирических способов определения числа ручьев штампа и их формы. Все эти способы основаны только на практике, и критерием для этих операций являются в основном соотношения габаритных размеров заготовки и поковки. Это говорит о низкой формализации накопленного опыта. Так же бросается в глаза то, что отсутствует четкий алгоритм действий, и большая часть решений должна основываться на опыте конструктора, которому предлагаются типовые варианты решений. В дальнейшем методика проектирования практически не изменилась, если не считать деталей. Скажем, в [2] изменили нумерацию типов поковок. Но такие косметические изменения методики не меняют характер процесса проектирования.

Рассмотрим историческое развитие систем автоматизированного проектирования в контексте автоматизации процесса проектирования штампа.

Первым и завершенным этапом автоматизации процесса проектирования штампов является автоматизация процесса разработки документации. Чаще всего такие системы называются двухмерными САПР (*2d CAD*). Данный тип систем к легким САПР. Первые разработки САПР данного типа относятся к 60-ым годам 20ого века. Далее появляются системы трехмерного моделирования (*3d CAD*). Первые САПР подобного типа появились еще в первой половине 70-ых годов 20 века, однако широкое распространение они получили много позже – с появлением графического интерфейса на ПЭВМ и начала поддержки формата *OpenGL*.

Вторым важным шагом автоматизации процесса разработки штампов является появление специализированных САПР ковочного производства. Таких систем не так много, и большой популярностью они не пользуются в силу того, что процесс разработки штампа слишком сильно завязан на технологические аспекты производства. На практике чаще всего приходится подстраивать САПР под каждого конкретного технолога. Это не позволяет выпустить на рынок массовый продукт. Кроме того, подобные системы рассчитаны на разработку штампа для узкого класса поковок.

Фактически в основе САПР данного типа лежит вышеописанная методика. Наиболее интересными системами подобного типа являются системы, разработанные в УГТУ-УПИ в 70-80-ых годах 20 века, поддерживаемые и сейчас. К этой серии относятся САПР УРАЛ-1, ГОШ, МАЛАХИТ, АГАТ. Данные САПР в комплексе позволяют автоматизировать процесс проектирования штампового инструмента для большинства массовых типов поковок. Подобные САПР разрабатываются и за рубежом [6], [7].

Третьим важным этапом автоматизации является появление систем моделирования технологических процессов, предназначенных для анализа пластического течения металла при обработке давлением, которые позволяют смоделировать непосредственно процесс штамповки. Данная математическая задача

для трехмерных тел была решена в конце 80-ых годов 20-ого века двумя компаниями *SFTC* и Кванторформ практически одновременно. На данный момент они и являются лидерами данного направления.

Эти решения несколько изменили подход конструкторов к проектированию штампа. Теперь конструктор после построения черного варианта поковки начинает методом подбора выискивать набор и очертания необходимых для штамповки ручьев и наиболее удачную по форме заготовку. Кроме того, данные системы позволяют оптимизировать внутреннюю структуру поковки, поскольку при моделировании легко определяются пограничные зоны, в которых резко изменяется величина деформации металла. Данные системы в большинстве случаев позволяют вынести в облой и напуск большинство проблемных зон. Кроме того, эти САПР позволяют свести к минимуму дорогостоящую и занимающую много времени операцию доводки штампа.

К сожалению, все перечисленные системы не позволяют решить ключевую проблему кузнечно-штамповочного производства – сквозное автоматизированное проектирование штамповочного инструмента для поковок сложной формы.

В работе [4] была рассмотрена возможность создания сквозной САПР технологического процесса ГОШ. Предлагается проектирование технологического процесса разбить на следующие 4 этапа:

- 1) Проектирование геометрии поковки по заданной геометрии детали.
- 2) Выбор технологических переходов штамповки.
- 3) Выбор исходной заготовки.
- 4) Конструирование инструмента.

В свою очередь каждый этап разбивается на ряд дополнительных этапов. Каждый этап представляет собой специфическую задачу, для решения которой используются различные информационные методы.

Дальнейший анализ показал, что наиболее важным и сложным является первый этап. Степень его формализации не позволяет получить решение для широкого класса поковок каким-либо отдельным интеллектуальным методом. Неоднократные попытки создания экспертных систем позволяли решить задачу только для определённых узких классов поковок, однако основную проблему все же составляют поковки сложной формы.

Применение нейросетей ограничивается необходимостью использовать слишком большое число нейронов, а так же отсутствием достаточного количества систематизированных решений для близких поковок сложной формы, набор которых требуются на этапе обучения нейросети.

Попытки разбить поверхность детали на ряд примитивов ограничены проблемой их стыковки между собой, поскольку мы в общем случае не сможем предсказать деформирование металла в пограничных зонах.

В ходе взаимодействия со специалистами ОАО «КУМЗ» и ФГУП УРАЛТРАНСМАШ нам удалось выяснить, что опытные конструкторы при рассмотрении деталей сложной формы в первую очередь начинают анализировать трехмерную модель детали послойно. Модель неосознанно разбивается на несколько слоев относительно линии разъема штампа, четкого определения гра-

ниц слоев не происходит. Более того, слои пересекаются между собой, это позволяет уйти от проблемы интерфейса между ними. Для конструктора на первом этапе необходимо лишь качественное понимание поведения металла при заполнении штампа.

Этот механизм позволил предложить алгоритм решения задачи построения поковки по имеющейся детали при помощи генетического алгоритма с внешними условиями, реализованными посредством продукционной базы знаний. Подробно этот алгоритм описан в работе [5].

### Список литературы

1. А.В. Ребельский А.Н. Брюханов, Конструирование и расчет штампов для горячей штамповки. Том 1. Молотовые и обрезаемые штампы. -М.:Машгиз. 1947 — 556 с.

2. Ковка и объемная штамповка стали : справочник : в 2-х т. / под ред. М. В. Сторожева. - 2-е изд., перераб. - М. : Машиностроение, 1967-Т. 1. - 1967. - 435 с.

3. Каплунов Б.Г., Возмищев Н.Е., Шахматова Л.Р., Селюнина Е.В. Учебно-проектные системы автоматизированного проектирования технологий и инструмента горячей штамповки. Подсистемы. Порядок применения. Челябинск: ЮУрГУ. 2000. - 60 с.

4. Б.М. Готлиб, И.Н. Крещенко, Р.Ф. Сергеев. Интеллектуализация процессов обработки металлов давлением: концептуальное проектирование технологических процессов и систем управления. Интеллектуальные системы управления / под ред. Акад. С.Н. Васильева. - М.: Машиностроение, 2010. С. 272 — 281.

5. Р.Ф. Сергеев, И.Н. Крещенко, Б.М. Готлиб. Применение эволюционных методов в проектировании штампов. Вычислительная техника и новые информационные технологии. Межвузовский научный сборник. Выпуск 7. - Уфа, 2011. С. 58 — 62.

6. M. S. Kim, J. C. Choi, Y. H. Kim, Ch. Kim, C. W. Park, The development of an automated process planning and die design system for multi former-bolt products. // «The International Journal of Advanced Manufacturing Technology» - 2004. - № 3-4 — с. 288-297.

7. Ch. Kim, C. W. Park, Development of an expert system for cold forging of axisymmetric product. Horizontal split and optimal design of multi-former die set. // «The International Journal of Advanced Manufacturing Technology» - 2006. - №5 — с. 459-474.

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА

### Аннотация

В работе рассматривается выбор оптимального плана с экономической точки зрения и с точки зрения взаимодействия между подразделениями предприятия на этапе перепланирования. Для решения задачи используются элементы теории игр и теории нечетких множеств.

### Введение

Задача планирования и перепланирования [2] производства осуществляется в условиях неполной информации [6]. Такая задача является важной и сложной [1]. В перепланировании принимают участие подразделения предприятия, которые непосредственно влияют на выпуск необходимой продукции. При этом подразделениям необходимо найти такой компромисс в перепланировании, чтоб он устраивал каждого. Инструменты для решения таких задач рассматриваются в теории игр [5].

### Материалы и методы исследования

Предположим, что предприятие выпускает изделия по заранее сформированному плану производства. Срок сдачи 100 готовых изделий заказчику 7 числа текущего месяца. По плану производство изделий начинается 1 числа текущего месяца. Производственный план по изделию  $x$  выглядит следующим образом:

Таблица 1.

*План производства изделия*

Число	1	2	3	4	5	6	7
Количество готовых изделий $X$	14	14	15	14	14	15	14
Итого на конец дня	14	28	43	57	71	86	100

Снабжение обеспечивает производство всеми необходимыми материалами, причем существует возможность завести готовые изделия к указанному сроку, но с затратами в два раза больше, чем их себестоимость при производстве.

Задача перепланирования рассматривается как задача теории игр. В качестве игроков выберем основные подразделения предприятия: снабжение, производство, отдел качества, сбыт и менеджмент. Стратегии каждого из подразделений ( $j$ ) определяются как дополнительные человеко-часы, которые данное подразделение может выделить сверх нормы –  $(x_j^i / \mu(x_j^i))$ . Функция принадлежно-

сти [3, 4] показывает степень, с которой игрок (подразделение) может принять предложенные изменения.

Будем называть план устойчивым [2], если, решая задачу перепланирования, можно найти равновесие по Нэшу[5]. При этом  $\sum_{j=1}^N c_j^i x_j^i < cT < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  - уровень

затрат, которые предприятие может допустить. Под равновесием Нэша будем понимать такое равновесие, при котором подразделениям предприятия будет невыгодно отклоняться от выбранных стратегий для перепланирования.

Решением поставленной задачи будет пересечение всех нечетких стратегий игроков с отображением в пространство значений функций выигрыша[3]:  $u_j^i : \bigcap_{j=1}^5 (x_j^i / \mu(x_j^i)) \rightarrow \bigcap_{j=1}^5 c_j^i x_j^i, \forall i : 0 < \mu(x_j^i) < L_{np}$ .

Пусть в третий день производства случилась поломка оборудования. При этом вместо запланированных 15 изделий было изготовлено к концу дня всего 3 единицы, в четвертый не изготовлено ничего. Таким образом, если не отходить от плана производства, то к концу 7 числа всего будет произведено 73 изделий. Перепланированный график выпуска будет выглядеть следующим образом:

Таблица 2

Факт производства изделия

Число	1	2	3	4	5	6	7
Количество готовых изделий $X$	14	14	3	0	14	15	14
Итого на конец дня	14	28	31	31	45	60	74

### Результаты исследования

Очевидно, что за три дня необходимо произвести 27 деталей сверх дневной нормы. Отметим, что нарушение обязательств влечет за собой неустойку равную 50 единицам затрат.

Для того чтобы минимизировать затраты необходимо разбить на каждый день по 9 изделий, таким образом уравновесив нагрузку на цех.

Рассмотрим следующий вариант решения задачи. Пусть изменение плана осуществляется за счет двух подразделений: производство и снабжение ( $N = 2$ ). При этом набор стратегий[5] (количество готовых изделий, которые каждый из игроков (производство и снабжение) может получить к концу одного рабочего дня)  $X_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}, X_2 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ .

Функции принадлежности[3, 4] для каждого из игроков (количество дополнительных изделий для производства и снабжения соответственно):

$$\mu(x_j^1) = \frac{x_j^1}{10}, 0 \leq \mu(x_j^1) \leq 1, j = 1, 2, \dots, 10$$

$$\mu(x_j^2) = \frac{x_j^2}{5}, 0 \leq \mu(x_j^2) \leq 1, j = 1, 2, \dots, 5$$

Ограничения на значения функций принадлежности можно определить следующим образом:

$$\mu(x_j^i) = \begin{cases} 0 \leq \mu \leq 0,5 - \text{Да} \\ 0,5 < \mu \leq 0,7 - \text{Скорее да} \\ 0,7 < \mu \leq 0,9 - \text{Скорее нет} \\ 0,9 < \mu \leq 1 - \text{Нет} \end{cases}$$

Функции выигрыша[5] каждого из игроков (в единицах затрат) будут иметь вид:

$$u_j^1 : (x_j^1 / \mu(x_j^1)) \rightarrow -x_j^1, j = 1, \dots, 10$$

$$u_j^2 : (x_j^2 / \mu(x_j^2)) \rightarrow -2x_j^2, j = 1, \dots, 5$$

График, отображающий функции принадлежности с ограничениями в зависимости от стратегий игроков, представлен на рис.1 (сплошная линия показывает взаимосвязь дополнительных изделий и функций принадлежности для снабжения, пунктирная – для производства). Стратегии игроков с функциями выигрыша представлены в таблице 3. Так как необходимо в день 9 дополнительных изделий, то возможные варианты могут принимать лишь значения, выделенные в таблице 3. Согласно функциям принадлежности мы можем рассмотреть два наилучших варианта:

- производство готово выполнить дополнительные обязательства, а снабжение скорее готово выполнить, чем не выполнить;
- снабжение готово выполнить дополнительные обязательства, а производство скорее готово выполнить, чем нет.

Данные варианты были взяты в качестве основных решений задачи, так как функции принадлежности принимают наилучшие из возможных вариантов. Исходя из значений функций выигрыша, приходим к выводу, что наименее затратным будет вариант, когда производство примет стратегию равную 7, а снабжение равную 2.

Решение задачи означает, что 9 дополнительных изделий в день не вызовет особых недовольств на производстве и никаких проблем у снабжения и минимизирует затраты на то, чтобы отгрузить готовые изделия заказчику вовремя.

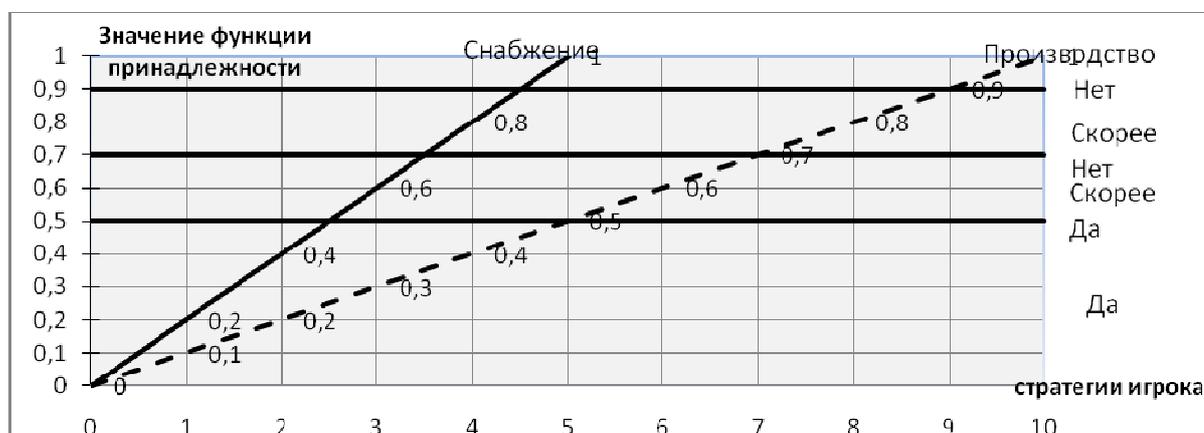


Рис. 1. График стратегий и функций принадлежности

Таблица 3

## Стратегии игроков с функциями выигрыша

	(0/0)	(1/0,1)	(2/0,2)	(3/0,3)	(4/0,4)
(0/0)	0;0	0;-1	0;-2	0;-3	0;-4
(1/0,2)	-2;0	-2;-1	-2;-2	-2;-3	-2;-4
(2/0,4)	-4;0	-4;-1	-4;-2	-4;-3	-4;-4
(3/0,6)	-6;0	-6;-1	-6;-2	-6;-3	-6;-4
(4/0,8)	-8;0	-8;-1	-8;-2	-8;-3	-8;-4
(5/1)	- 10;0	-10;-1	-10;-2	-10;-3	-10;-4

Таблица 4.

## Стратегии игроков с функциями выигрыша(продолжение)

(5/0,5)	(6/0,6)	(7/0,7)	(8/0,8)	(9/0,9)	(10/1)
0;-5	0;-6	0;-7	0;-8	0;-9	0;-10
-2;-5	-2;-6	-2;-7	-2;-8	-2;-9	-2;-10
-4;-5	-4;-6	-4;-7	-4;-8	-4;-9	-4;-10
-6;-5	-6;-6	-6;-7	-6;-8	-6;-9	-6;-10
-8;-5	-8;-6	-8;-7	-8;-8	-8;-9	-8;-10
-10;-5	-10;-6	-10;-7	-10;-8	-10;-9	-10;-10

**Выводы**

Приведен способ выбора оптимального плана с экономической точки зрения, а также учтен фактор взаимодействия между подразделениями в процессе перепланирования. Решение задачи основано на элементах теории игр и нечетких множеств.

**Список литературы**

1. Гаврилов, Д.А. Управление производством на базе стандарта MRP II . Санкт-Петербург : Издательский дом «Питер», 2003.
2. Елисеев А. С., Федосеев С. А., Гитман М. Б. К вопросу об устойчивости систем контроля качества на предприятии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011.– №34. – С. 34-36.
3. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений – Москва: Мир, 1976. – 168 с.
4. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982. – 432с., ил.
5. Л. А. Петросян, Н.А. Зенкевич, Е.А. Семина. Теория игр: Учеб.пособие для ун-тов: М.: Высш. шк., Книжный дом «Университет», 1988. – 304 с.: ил.
6. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.:МПСИ, 2005. -584 с.

## СИНТЕЗ МУЛЬТИСТАРТОВОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА БЕЗУСЛОВНОЙ МНОГОМЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДЕРЖКИ

### Аннотация

В работе приводится постановка задачи оптимизации функционирования регулируемого перекрестка – минимизации функции транспортной задержки и синтезируется численный алгоритм ее решения.

В практических задачах оптимизации экономических, технических или технологических процессов могут возникать функции, отыскивание экстремумов которых представляется довольно сложной, а порой и нереализуемой задачей из-за неудобств при нахождении производных.

Например, рассмотрим процесс оптимизации функционирования элемента транспортной системы современного города – регулируемого перекрестка. Сегодня проблемы, связанные с управлением транспортными потоками, становятся все более актуальными. Это связано, в первую очередь, с ростом уровня автомобилизации и транспортной мобильности населения, а также с несовершенством планирования улично-транспортных сетей мегаполисов и моральным устареванием и изношенностью объектов светофорной сигнализации на пересечениях городских магистралей. Следовательно, нужно оптимизировать по мере возможности существующие элементы управления транспортными потоками.

Для решения проблемы транспортных заторов на регулируемых перекрестках обычно в качестве показателя качества их функционирования используется величина средней транспортной задержки регулирования. На протяжении долгого времени в нашей стране основной моделью для расчета этого показателя была и остается формула, полученная Ф. Вебстером [5].

Альтернативой модели Вебстера может выступать следующая модель, полученная на основе [3,4]:

$$d = k_f \cdot \left( \frac{T \left(1 - \frac{g}{T}\right)^2}{2 \left(1 - \min\{1, X\} \frac{g}{T}\right)} \right) + \frac{T}{4} \left( (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + 14400 \frac{X}{T \cdot c}} \right) + d_3,$$

где  $T$  – длительность цикла регулирования, с;  $g$  – продолжительность разрешающего сигнала для данной фазы, с;  $X$  – степень насыщения – отношение интенсивности движения к пропускной способности;  $c$  – пропускная способность;  $t_e$  – длительность оцениваемого периода, с;

$k$  – коэффициент, показывающий наличие адаптивного регулирования;  
 $I$  – коэффициент учета удаленности от соседнего регулируемого перекрестка.

Поставим задачу минимизации агрегированной задержки на перекрестке, т.е. нахождения оптимального времени цикла и распределения его по фазам.

Найти вектор  $(T, g^1, \dots, g^m)$ , такой что следующая функция достигает глобального минимума:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^m \left[ k_f^i \frac{T \left( 1 - \frac{g^i}{T} \right)^2}{2 \left( 1 - \min \left\{ 1, X^i \right\} \frac{g^i}{T} \right)} + \frac{T}{4} \left( (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + 14400 \frac{X}{T \cdot c}} \right) \right] \cdot v^i}{\sum_{i=1}^m v^i} \rightarrow \min$$

при системе ограничений: 
$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m g_i = T, \\ T_{\min} \leq T \leq T_{\max}, \\ (g_i)_{\min} \leq g_i \leq (g_i)_{\max}, i = 1, \dots, m. \end{cases}$$

Учитывая систему вторых и третьих ограничений системы, получаем множество  $X$ , представляющее собой гиперкуб, на котором и будем производить минимизацию.

Таким образом, задача сводится к задаче условной минимизации с ограничением-равенством.

Для перехода к задаче безусловной минимизации построим квадратичную штрафную функцию вида

$$\begin{aligned} \varphi(g, T, \beta) = & \beta \left( \left( \sum_{i=1}^m g_i \right) - T + L \right)^2 + \sum_{i=1}^m (g_i - (g_i)_{\min})^2 [1 - \text{sign}(g_i - (g_i)_{\min})] + \\ & + \sum_{i=1}^m ((g_i)_{\max} - g_i)^2 [1 - \text{sign}((g_i)_{\max} - g_i)] + (T - T_{\min})^2 [1 - \text{sign}(T - T_{\min})] + \\ & + (T_{\max} - T)^2 [1 - \text{sign}(T_{\max} - T)], \end{aligned}$$

которая будет стремительно увеличиваться за пределами гиперкуба  $X$  и обращаться в ноль внутри его.

Получаем задачу многомерной безусловной минимизации

$$\tilde{D} = D + \varphi(g, T, \beta) \rightarrow \min.$$

Решать полученную задачу будем численно [1,2] на основе мультистартового параллельного алгоритма безусловной многомерной минимизации.

Шаг 0. Задаем параметры

$n + 1$  – число компонент вектора, по которому проводится оптимизация,  $n$  – число моделируемых равномерно распределенных точек на области минимизации,  $\Delta\beta$  – приращение параметра штрафной функции, например,  $\Delta\beta = \lg(k)$ ,  $\varepsilon_1 > 0$  – точность шага алгоритма оптимизации,  $\varepsilon_2 > 0$  – точность алгоритма,  $\delta > 0$  – параметр кластеризации.

Шаг 1. В качестве начального значения для множителя штрафной функции выбираем  $\beta = 0$ . Тем самым найдем глобальный минимум исходной функции без учета ограничения-равенства.

Шаг 2. Для заданной функции без ограничений моделируем на множестве  $X$   $n$  равномерно распределенных в  $R^{m+1}$  точек  $x_1, \dots, x_n$ .

Шаг 3. Минимизация функции со штрафом для конкретного параметра  $\beta$ .

Шаг 3.1. Используем полученные точки в качестве начальных и проводим одну или несколько итераций алгоритма статистического градиента с целью улучшения рабочих точек. В результате получаем точки  $z_1, \dots, z_n$  (для первой итерации используем точки шага 2, для последующих – точки шага 3.4).

Шаг 3.2. Применяем кластеризацию к полученным точкам  $z_1, \dots, z_n$ .

Шаг 3.2.1. Полагаем, что все точки принадлежат различным кластерам.

Шаг 3.2.2. Находим ближайшую пару  $z_i, z_j$ , такую, что  $\rho_{ij} = \arg \min_{k,l=1,\dots,N} \rho_{k,l}$ . Здесь в качестве расстояния можно использовать

обычную евклидову норму  $\rho(z_i, z_j) = \sqrt{\sum_k (z_{i,k} - z_{j,k})^2}$ .

Шаг 3.2.3. Если расстояние между ближайшими соседями не превосходит некоторое достаточно малое число  $\delta > 0$ , то  $z_i, z_j$  объединяются в один кластер, и, тем самым, число кластеров сокращается на единицу.

Пусть получено  $m$  кластеров. Если  $m = 1$ , переходим к шагу 3.4, иначе – к шагу 3.3.

Шаг 3.3. Выбираем представителей от всех кластеров (т.е. точку из каждого кластера, доставляющую наименьшее значение целевой функции). Полагаем  $N = m$  и переходим к шагу 3.

Шаг 3.4. Находимся в окрестности глобального минимума. Выбираем представителя единственного кластера. Используем его в качестве начальной точки для алгоритма локальной оптимизации, например, того же алгоритма статистического градиента.

Для окончания шага безусловной оптимизации используем критерий  $|\tilde{D}(z^k, \beta^k) - \tilde{D}(z^{k-1}, \beta^k)| \leq \varepsilon_1$ . Если условие выполнено, переход на шаг 4.

Шаг 4. Проверка условия окончания алгоритма  $|\tilde{D}(z^{k+1}, \beta^k) - \tilde{D}(z^k, \beta^{k-1})| \leq \varepsilon_2$ . Если условие выполнено – полагаем  $z^{k+1} = z^* = (T, g^1, \dots, g^m)$ , в противном случае – переход на шаг 5.

Шаг 5. Пересчет (увеличение) параметра  $\beta$  штрафной функции по заданному правилу:  $\beta^{k+1} = \beta^k + \Delta\beta$ . Переход на шаг 2.

### Алгоритм статистического градиента

Шаг 1. Выбрать начальную точку  $x_0 = (x_1, \dots, x_n) \in R^{m+1}$ , пробный шаговый множитель  $\gamma > 0$ , рабочий шаговый множитель  $\rho > 0$ , число пробных шагов  $p \geq 1$ . Положить  $t = 0$ .

Шаг 2. Вычислить  $p$  случайных независимых реализаций  $\xi^{t,i}, i = 1, \dots, p$  единичного вектора  $\xi^t$  равномерно распределенного по всем направлениям в  $R^{m+1}$ .

Шаг 3. Вычислить приращение функции  $\tilde{D}$

$$\Delta_i^t = \tilde{D}(x^t + \gamma \xi^{t,i}) - \tilde{D}(x^t), \quad i = 1, \dots, p.$$

Шаг 4. Вычислить вектор  $grad^t = \sum_{i=1}^p (\xi^{t,i} \Delta_i^t)$ .

Шаг 5. Вычислить вектор движения  $h^t$  к следующему приближению  $x^{t+1}$  по формуле  $h^t = -\frac{grad^t}{\|grad^t\|}$ .

Шаг 6. Вычислить следующее приближение по формуле  $x^{t+1} = x^t + \rho h^t$ .

Шаг 7. Полагаем  $t = t + 1$  и переходим к шагу 2.

Заметим, что при  $p \rightarrow \infty, \gamma \rightarrow 0, grad^t$  - статистическая оценка градиента функции  $\tilde{D}$  в точке  $x^t$ .

В результате получен численный алгоритм многомерной оптимизации, который используется для решения задачи оптимального распределения времени цикла светофорного регулирования по фазам.

### Список литературы

1. Бейко И.В. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации / И.В. Бейко, Б.Н. Бублик, П.Н. Зинько. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 512 с.

2. Турчак Л.И. Основы численных методов: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Л.И. Турчак, П.В. Плотников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 304 с.

3. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections 2008. Institute of Transportation Engineers, District 7 – Canada. ISBN 978-1-933-45224-1

4. Highway Capacity Manual. Volume 3: Interrupted Flow. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, DC. – 2010. ISBN 978-0-309-16080-3

5. Webster, F.V. Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper No. 39. London: Great Britain Road Research Laboratory, 1958.

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЛЕСНОЙ ТАКСАЦИИ**

### **Аннотация**

В статье рассмотрен подход к созданию бортовых систем автоматизации лесной таксации в режиме реального времени на основе систем поддержки принятия решений и нечеткой логики. Выделены основные таксационные показатели древостоя, пригодные для обработки в автоматическом режиме, а также показаны основные идеи создания средств наземного измерения таксационных показателей древостоя.

### **Введение**

В развитии лесопромышленного комплекса Российской Федерации в настоящее время существует серьезное противоречие между высоким уровнем технической вооруженности лесозаготовителей и низким уровнем производительности труда. Более чем десятилетний опыт использования дорогостоящих современных лесозаготовительных машин зарубежного производства — харвестеров, форвардеров, валочно-пакетирующих машин показал, что первоначальные надежды на достижение высокой производительности труда и снижение затрат, связанные только лишь с приобретением новой техники, не оправдали себя. Неоспоримым фактом является то, что работающие по контрактам в лесозаготовительных компаниях России финские подрядчики в тех же условиях дают значительно большую выработку на машину при меньших затратах, чем их местные коллеги. Исходя из этого, совершенно очевидно, что корень проблемы производительности кроется в соответствующем уровне подготовки операторов транспортно-технологических машин.

Тем временем следует отметить, что в Финляндии процесс обучения операторов носит комплексный подход. Так, помимо основных навыков работы с лесозаготовительной машиной и развития моторных психофизиологических факторов оператор получает и обучение по программе лесного таксатора, т. е. специалиста, осуществляющего инвентаризацию леса, отбор деревьев в рубку и лесоустройство. Такой комплексный подход к обучению в лесотехнических школах Финляндии и Швеции занимает 3 года и влечет серьезные финансовые затраты.

Важным моментом при анализе производительности труда является и вид механизированной рубки, производимой оператором. Рубки леса принято разделять на рубки главного пользования и рубки ухода за лесом (или промежуточные). В обоих случаях существуют подвиды рубок, связанные с выбором деревьев, назначаемых в рубку. Так в рубках главного пользования это выборочные рубки, при которых на всей площади насаждения вырубает отдельные спелые и перестойные деревья по мере необходимости

освобождения подроста и молодняка от материнского полога, а также неспелые деревья, оставлять которые нецелесообразно. Что касается рубок ухода, то все их виды носят выборочный характер, будь то рубка осветления, прочистки или какая либо иная [1]. Другими словами, оператору лесозаготовительной машины помимо всех основных механических операций по валке и раскряжевке дерева требуется первоначально выполнить работу по таксации насаждений и выбрать то дерево, которое следует назначить в рубку.

Исходя из вышесказанного, становится очевидна проблема производительности, связанная не столько с навыками работы с лесозаготовительной машиной, сколько со слабым уровнем разделения труда и возложением обязанностей таксатора на оператора лесозаготовительной машины.

Целью данной работы является создание методов и бортовых мобильных систем поддержки принятия решений, позволяющих выполнять таксацию (выбор) насаждений без вмешательства человека основываясь на базе знаний экспертов-таксаторов. Это позволит значительно повысить производительность труда операторов харвестеров с одновременным снижением издержек на их обучение.

### **Теоретический анализ**

Одним из ключевых вопросов при разработке методов автоматизированной лесной таксации в режиме реального времени является проблема создания средств измерений таксационных показателей древостоя. В практике учета леса приняты следующие основные показатели, подлежащие измерению [2]:

- высота ствола ( $H, h$ ) – м;
- диаметры на различных высотах ствола ( $D, d$ ) – см;
- площади поперечных сечений ( $g, \gamma$ ) – м<sup>2</sup>;
- объем ствола или его части ( $V, v$ ) – м<sup>3</sup>;
- возраст дерева ( $A, a$ ) – год;
- сумма площадей поперечных стволов ( $\Sigma G, \Sigma g$ ) – м<sup>2</sup>/га;
- запас насаждения ( $M$ ) – м<sup>3</sup>/га;
- число деревьев на единице площади ( $N, n$ ) – шт./га;
- площадь земель ( $S$ ) – га и т. п.

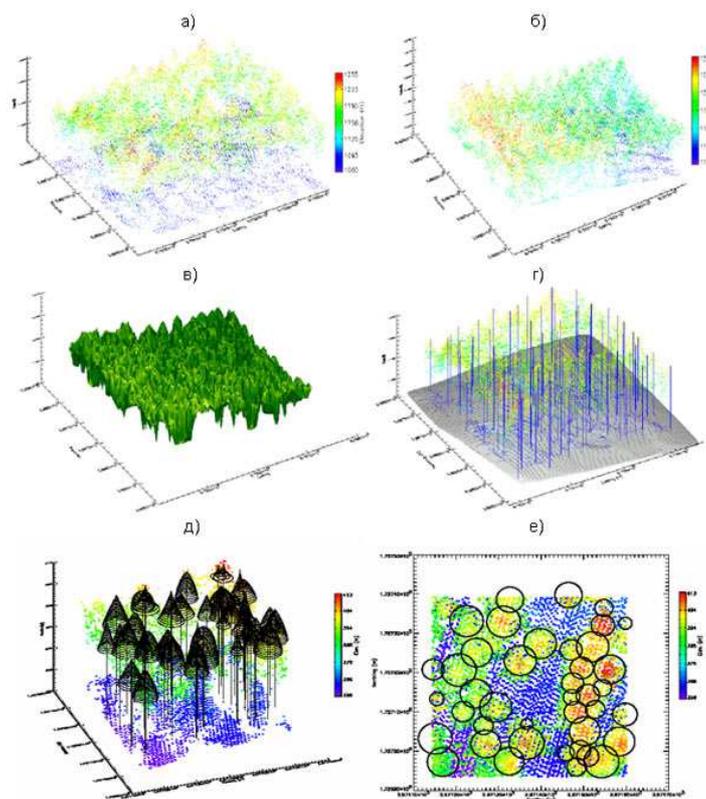
Кроме отмеченных данных, при оценке отдельных деревьев определяют следующие таксационные признаки:

- коэффициенты формы ( $q$ );
- видовые числа ( $f$ ) – 0,001;
- приросты таксационных показателей ( $Z$ ) и их изменения ( $\Delta$ ) – в тех же единицах учета, что и сами показатели.

Автоматизированные измерения в лесной таксации связаны с применением тех или иных технических приборов и устройств (например, лазерное измерение образующей ствола с использованием программно-технических комплексов, автоматизированное дешифрирование некоторых таксационных показателей насаждения по аэрофотоснимкам и др.).

В настоящее время известны способы измерения таксационных показателей с использованием аэрофотоснимков, высотного лазерного сканирования полого леса с летательного аппарата [4], горизонтальной радиолокации лесных покровов сверхвысокочастотным наносекундным радиолокатором в диапазоне 10 ГГц [5].

Все эти методы так или иначе могут быть использованы в ходе выполнения лесочетных работ, однако для идентификации того или иного дерева и измерения его показателей с достаточной точностью они не применяются. Так, в частности, перспективный способ лазерной таксации леса с летательного аппарата позволяет оценить лишь плотность насаждений без уточнения данных о коэффициентах формы ствола, его диаметре и других важных показателях. В этом случае цифровая модель лесного полого генерируется из исходных данных лазерной локации способом фильтрации импульсов сканера, отраженных от земной поверхности и растительности, путем интерполяции точек земли (рис. 1) [3].



*Рис. 1. Трехмерная цифровая реконструкция и визуализация массива точек лазерного сканирования лесного участка площадью 0.4 га: а) - исходный массив точек лазерной локации, б) - тот же массив, после выполнения процедуры фильтрации, в) - цифровая модель (поле распределения) лесного полого с фиксированным размером пикселя 0.3 м, г) - цифровая модель стволов и крон деревьев, интегрированная с цифровой моделью рельефа, д) - полная трехмерная реконструкция древостоя, е) - плановая проекция полого древостоя с оконтуренными кронами деревьев основного яруса*

## Техническое проектирование

Для измерения таксационных показателей древостоя в настоящее время разрабатывается способ, пригодный для использования в качестве бортовой системы харвестера.

Основанный на известном способе лазерной таксации, разрабатываемый способ отличается тем, что лазерный локаатор устанавливается на лесозаготовительной машине и проецирует инфракрасные лазерные лучи на полог леса в области, доступной для захвата стрелой харвестера. Спроецированная лазерными лучами координатная сеть доступна для обзора цифровой видеокамерой с установленным светофильтром для фильтрации изображений, отличных по длине волны от инфракрасного спектра излучения. Таким образом, на выходе видеокамеры имеется изображение в виде матрицы  $m \times n$  из 0 и 1, где  $m \times n$  — разрешающая способность используемой видеокамеры, а области со спроецированным лазерным лучом соответствует единичная область в матрице видеоизображения.

Анализируя полученную матрицу, легко определить такие таксационные показатели дерева, как высота ствола, диаметры ствола на различных высотах, запас насаждений, коэффициенты формы и т.д. с достаточной для принятия решения о назначении рубки точностью.

Структурная схема интеллектуальной системы лесной таксации показана на рис. 2.

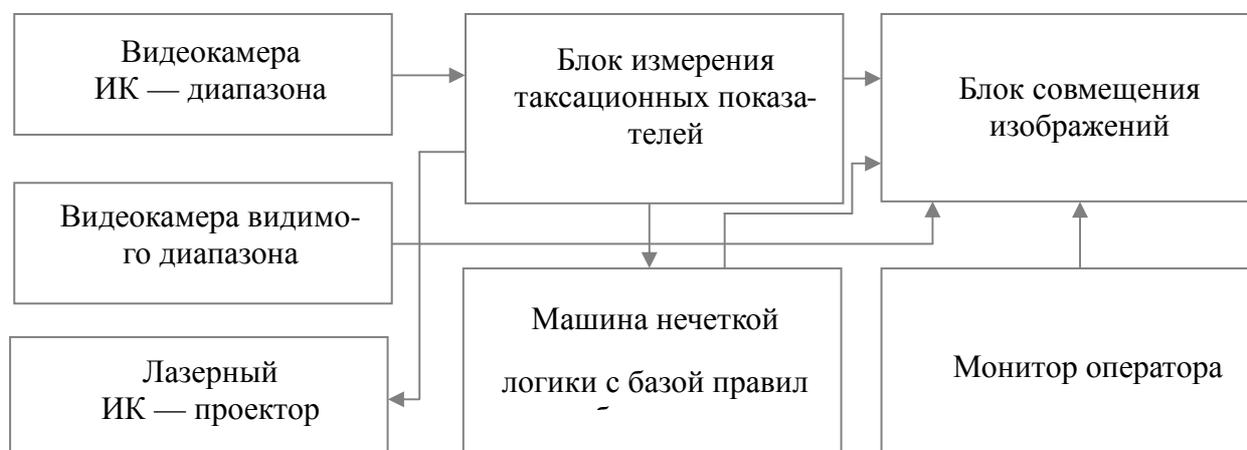


Рис. 2. Структурная схема интеллектуальной системы лесной таксации

Блок измерения таксационных показателей представляет собой программный модуль математической обработки полученных изображений, который предназначен для трехмерной реконструкции и визуализации массива точек лазерной проекции с последующим выделением объектов и измерением их таксационных показателей.

Измеренные показатели всех обнаруженных объектов поступают для обработки в машину нечеткой логики, которая основываясь на базе правил выбора дерева для назначения его в рубку выносит вероятностное решение по всем обнаруженным объектам. Следует отметить, что база правил уникальна для каждого вида производимых рубок и формируется экспертами заранее.

Блок совмещения изображений получает вероятностное решение о назначении рубки по каждому обнаруженному объекту и предназначен для формирования изображения полога леса с отметкой дерева, назначенного в рубку с максимальной вероятностью. Формирование метки происходит на видеоизображении, полученном с видеокамеры видимого диапазона, механически связанной с видеокамерой ИК-диапазона, что обеспечивает полное соответствие их координатных пространств. Далее полученное видеоизображение с наложенной отметкой в области дерева с максимальной вероятностью назначения рубки поступает на монитор оператора.

### **Заключение**

Использование интеллектуальных систем лесной таксации в качестве бортовых приборов контроля несплошных рубок леса способно значительно повысить разделение труда оператора лесозаготовительной машины и, как следствие, повысить производительность его труда с одновременным снижением издержек на обучение за счет исключения из комплексной программы обучения материалов по лесоустройству и лесной таксации. Дальнейшее развитие метода автоматизированной лесной таксации позволит внедрить его в качестве неотъемлемой части лесосчетных работ и еще более оптимизировать механизированные рубки за счет учета в реальном времени заготавливаемых сортиментов и оптимизации работы пары харвестер — форвардер.

### **Список использованной литературы**

1. Кочегаров, В. Г. и др. Технология и машины лесосечных работ [Текст] : Учебник для вузов / В. Г. Кочегаров, Ю. А. Бит, В. Н. Меньшиков / – М. : Лесная пром-сть, 1990. – 392 с. ISBN 5 – 7120 – 0313 – 9.
2. Промежуточное пользование лесом на Северо-Западе России / Ананьев В.А., Асикайнен А., Вяльккю Э., Герасимов Ю.Ю., Демин К.К., Сиканен Л., Сюнев В.С., Тюкина О.Н., Ширнин Ю.А. Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии, 2005. – 150с.
3. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: Учебное пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Геолидар, Геокосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. - 229 с.: илл. - 160; табл. - 45; библиогр. Назв. - 87.
4. Данилин И.М., Медведев Е.М., Абэ Н.И., Худак А.Т., Санкт-Онге Б. Высокие технологии XXI века для аэрокосмического мониторинга и таксации лесов. Задачи исследований и перспективы использования // Лесная таксация и лесоустройство. - 2005. - Выпуск 1(34). - С. 28-38.
5. Очиров О.Н., Доржиев Б.Ч., Базаров А.В. Результаты использования короткоимпульсной системы контроля лесной среды // Ползуновский вестник. 2011. № 3/1. С. 162–168.

## АНАЛИЗ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ИМПЕДАНСНЫХ СПЕКТРОВ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

### Аннотация

Исследованы импедансные спектры процесса плазменно-электролитического оксидирования с помощью различных аналого-цифровых измерительных систем. Показано, что для управления технологическим процессом ПЭО с применением спектральной диагностики толщины покрытия по схеме замещения достаточно применения развертки частоты в диапазоне 5...20000 Гц длительностью 3...6 с при частоте дискретизации 200...250 кГц.

### Введение

Внедрение современных ресурсосберегающих технологий в области авиастроения требует создания надежных способов и систем для контроля за ходом процессов модификации поверхностных слоев. Так, для инновационного процесса плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) предложен метод спектральной диагностики на основе анализа импедансных спектров электролизера [1]. *In-situ* импедансная спектроскопия процесса ПЭО позволила выявить основные особенности эквивалентной схемы замещения электролизной системы, однако для получения адекватной модели требуются дополнительные исследования. Целью данной работы является исследование импедансных спектров процесса ПЭО в области низких частот для уточнения параметров информационно-измерительных систем спектральной диагностики.

### Методика исследования

Исследования частотных характеристик процесса ПЭО проводились с использованием двух аналого-цифровых систем сбора данных. Система 1 базируется на цифровом осциллографе *TEKTRONIX TDS-430A*, система 2 – на плате сбора данных *National Instruments PXI-5922*. Система 2 имеет меньшую предельную частоту дискретизации, но больший объем буфера данных и большую разрядность по сравнению с системой 1, что позволяет детально исследовать низкочастотный диапазон. Параметры запуска систем сбора данных приведены в таблице 1.

Эксперименты по ПЭО алюминиевых образцов проводились в течение 20 мин. в биполярном импульсном режиме при амплитуде и коэффициенте заполнения положительного импульса 587 В и 51 % соответственно, отрицательного – 57 В и 27 % соответственно, с симметричными паузами. Толщина покрытия составила 20...22 мкм.

Параметры систем сбора данных

	Система 1	Система 2
Интервал запуска $\Delta t$ , с	10	20
Длительность развертки частоты, с	0,48	10
Тип развертки	Непрерывная, логарифмическая	
Начальная частота развертки $f_1$ , Гц	20	2
Конечная частота развертки $f_2$ , Гц	20	
Частота дискретизации $f_s$ , кГц	250	200
Размер выборки $S_b$	120 000	2 000 000
Разрядность данных, бит	8	16
Шаг дискретизации по напряжению, В	4	0,1
Шаг дискретизации по току, А	0,4	0,01

Расширение диапазона исследуемых частот и увеличение длительности развертки частоты позволило исследовать низкочастотную область импедансного спектра процесса ПЭО.

### Результаты и их обсуждение

На основе полученных данных с помощью программного комплекса *FRAnalysis* были построены импедансные спектры, представляющие собой оценки комплексного сопротивления электролизера  $\underline{Z}(j\omega) = Z(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$ ; также была оценена ошибка расчета (рис. 1 и 2).

Представленные на рис. 1 и 2 импедансные спектры в области частот 20...20000 Гц аналогичны. Виден экстремальный характер модуля импеданса  $Z$  с максимумом в области 1700...2200 Гц. С течением времени модуль импеданса возрастает со скоростью 2...6 Ом/мин, с достижением максимального значения в 170...200 Ом в диапазоне частот 1800...1900 Гц. Такая динамика может быть связана с уменьшением эквивалентной проводимости, связанной со снижением плотности распределения микроразрядов при росте покрытия. Следует отметить, что наиболее сильно рост модуля импеданса происходит в области экстремума, причем частота, соответствующая экстремуму, уменьшается со скоростью порядка 10 Гц/мин. Значение аргумента импеданса  $\varphi$  отрицательно и существенно изменяется в зависимости от частоты в диапазоне  $-10...-80^\circ$ , увеличиваясь по абсолютной величине при росте частоты, достигая экстремального значения  $-70...-75^\circ$  на частоте 17...20 кГц. Положение экстремума смещается в область низких частот в ходе обработки. Аргумент импеданса сильно растет по абсолютному значению в начале обработки, но после 10 мин. изменяется слабо. Наибольшие значения модуля и аргумента импеданса достигаются к концу обработки 20 мин.

Ошибка определения модуля  $\varepsilon_Z$  мало изменяется во времени, но сильно увеличивается при уменьшении частоты и составляет в среднем 1,9...2,5 %, ошибка определения аргумента  $\varepsilon_\varphi$  также слабо изменяется во времени, но увеличивается при росте частоты и составляет в среднем 2,8...3,2 %.

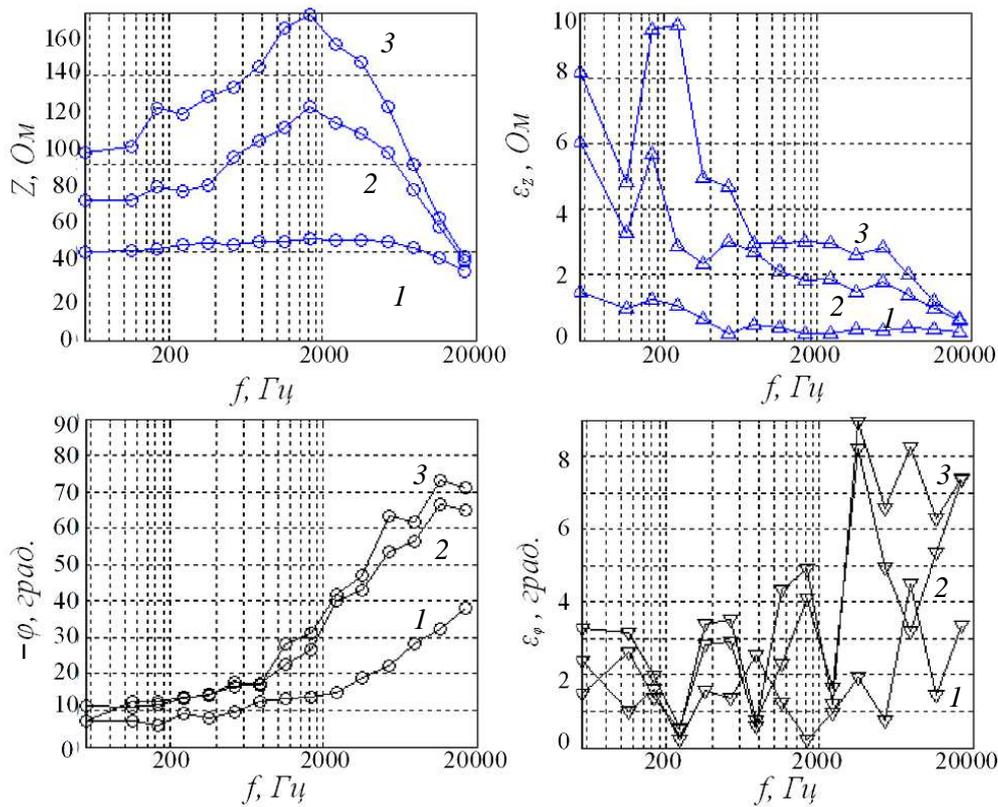


Рис. 1. Импедансные спектры ( $Z, \varphi$ ) процесса ПЭО и ошибки определения модуля и аргумента ( $\varepsilon_Z, \varepsilon_\varphi$ ) для системы 1. (1 – 0 мин, 2 – 10 мин, 3 – 20 мин)

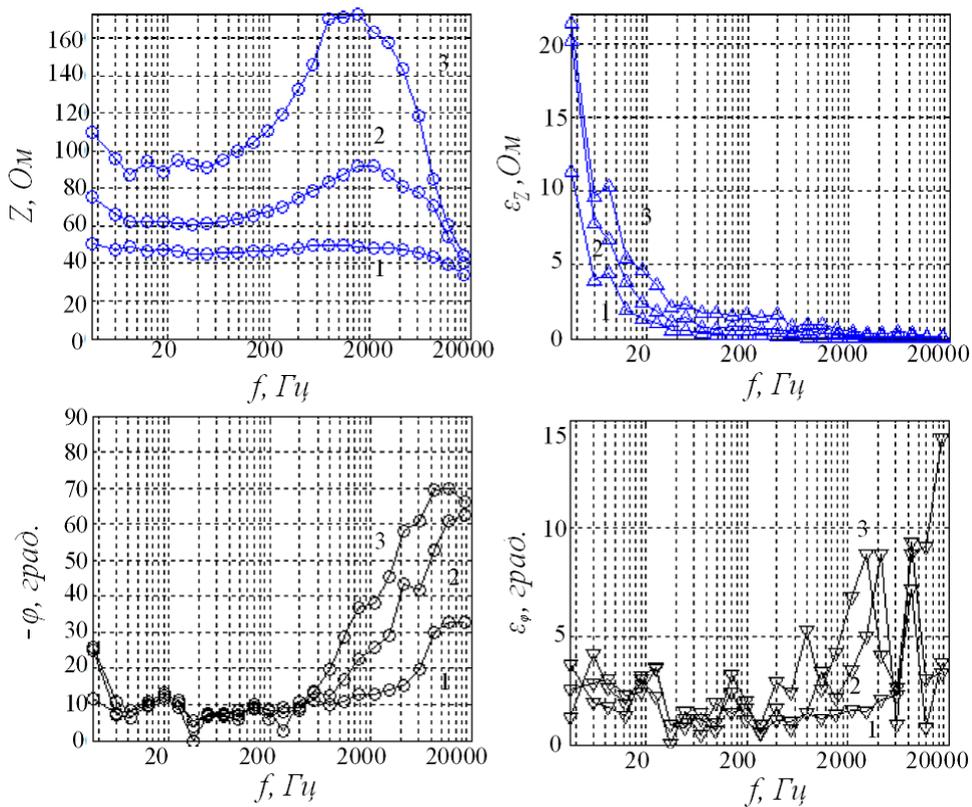


Рис. 2. Импедансные спектры ( $Z, \varphi$ ) процесса ПЭО и ошибки определения модуля и аргумента ( $\varepsilon_Z, \varepsilon_\varphi$ ) для системы 2. (1 – 0 мин, 2 – 10 мин, 3 – 20 мин)

Неравномерность ошибки связана с уменьшением разрешающей способности по частоте на границах диапазона. Вблизи низкочастотного края исследуемого диапазона частот возрастание ошибки оценки модуля импеданса связано с сильным уменьшением количества периодов требуемой частоты в кадре непрерывной развертки, что требует увеличения длительности развертки и, соответственно, размера выборки  $S_b$ . Вблизи высокочастотного края возрастание ошибки оценки аргумента импеданса связано с приближением у частоте дискретизации и ухудшением соотношения  $f/f_s$ .

Сравнение систем 1 и 2 позволяет установить следующие закономерности. Благодаря большему размеру выборки  $S_b$  для системы 2 средняя ошибка ниже и импедансные спектры не требуют дополнительной аппроксимации, динамика модуля и аргумента наблюдается свободно. В динамике оценок импедансных спектров в области частот 2...20 Гц в системе 2 при уменьшении частоты наблюдается рост модуля и аргумента импеданса на 20 % и на 40 % соответственно. Данный факт говорит о возможном наличии низкочастотной постоянной времени, проявляющейся в возможном экстремуме на частотах порядка 0,1...1 Гц, что может быть связано как с диффузионными ограничениями, так и с влиянием емкости тонкого барьерного слоя покрытия [3]. Однако указанные процессы не препятствуют оценке толщины покрытия с помощью спектральных методов диагностики, поэтому значительного расширения диапазона частот при управлении процессом ПЭО не требуется, при этом необходимо увеличение длительности развертки частоты.

### **Выводы**

Таким образом, исследование низкочастотной области импедансных спектров процесса ПЭО показало, что для управления технологическим процессом ПЭО с применением спектральной диагностики толщины покрытия по схеме замещения достаточно применения развертки частоты в диапазоне 5...20000 Гц длительностью 3...6 с при частоте дискретизации 200...250 кГц.

### **Благодарность**

Авторы выражают благодарность Британскому Королевскому обществу за финансовую поддержку исследований (грант № IE111315).

### **Список литературы**

1. Parfenov, E.V. Methodology of Data Acquisition and Signal Processing for Frequency Response Evaluation during Plasma Electrolytic Surface Treatments / E.V. Parfenov, A. Yerokhin // Process Control: Problems, Techniques and Applications. Ed. S. P. Werther. – New York: Nova Publ., 2011. P. 63-96.
2. Parfenov E.V., Yerokhin A. L., Matthews A. Frequency response studies for the plasma electrolytic oxidation process // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. P. 8661-8670.
3. Curioni M., Koroleva E.V., Skeldon P., Thompson G.E. Flow modulated ionic migration during porous oxide growth on aluminium // Electrochimica Acta, 2010. Vol. 55. P. 7044-7049.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ НЕРВНОГО ИМПУЛЬСА В ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

### **Аннотация**

В данной статье рассматривается задача интеллектуального управления робототехническими системами. Так же описывается математическая модель проведения нервного импульса.

В настоящее время наиболее актуальной является задача интеллектуального управления различными робототехническими системами. Под интеллектуальным управлением понимается подача высокоуровневых команд исполнительному устройству, которое в свою очередь должно ее декомпозировать, составить план выполнения и выполнить команду в соответствии плану учитывая изменяющиеся условия внутренней и внешней среды. Таким образом, мы имеем ряд подзадач. Сначала нужно проанализировать команду на предмет противоречий и суметь ее декомпозировать. Затем нужно составить план, учитывающий различные варианты выполнения команды. И выполнить план, учитывая и приспособившись к условиям окружающей обстановки.

Анализ команды есть не что иное, как отображение последовательности мнемоник на некоторое семантическое пространство. Декомпозиция здесь – отображение семантического пространства команды на пространство целей и действий. Так же в это пространство отображается состояние окружающей среды. В таком виде эта задача сводится к задаче многомерной нелинейной оптимизации. Но нужно учесть большое количество обратных связей и динамику изменения окружающей среды. Ни один из современных методов оптимизации не может решить эту задачу. Тем не менее, эта задача успешно решается биологическими нейронными сетями. Рассмотрим неокортекс как наиболее удачную структуру нейронной сети.

Неокортекс – высокоструктурированная внешняя область мозга, отвечающая за сенсорное восприятие, мышление, речь и т.д. Неокортекс представлен корой головного мозга. В общем случае все области коры структурированы одинаково, они состоят из высокоспециализированных колонок, которые в свою очередь разбиваются на слои. Каждый слой специфичен. В них располагаются определенные по морфологии нейроны [3], дендритные сети нейронов, аксонные сети. Предлагается моделировать работу неокортекса, учитывая динамику проведения нервных импульсов.

Моделирование проведения импульса необходимо для описания процессов в дендритном дереве нейрона. В зависимости от диаметров и деполяризации участков дендрита, входящих в узел ветвления, он может выполнять И или ИЛИ функцию [2]. Один нейрон обладает не только функцией пространственно-временного суммирования, но и функцией нелинейного логического эле-

мента, что, безусловно, расширяет его возможности в плане интеграции прошедших импульсов и соответственно дает большие возможности в дифференциации входных паттернов.

Построим общую математическую модель распространения импульса потенциала в возбудимых и невозбудимых средах. Распространение импульса по нервному волокну можно описать уравнением следующего вида:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \gamma^2 \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = f_B(x, t, A) + f_C(x, t, A), \quad (1)$$

где  $A$  – амплитуда импульса,

$\gamma$  – скорость распространения волны возбуждения,

$f_B(x, t, A)$  – нелинейная функция возбуждения,

$f_C(x, t, A)$  – нелинейная функция сопротивления волокна.

$$f_B(x, t, A) = A(T_{res} - A)(A - 1),$$

где  $T_{res}$  – порог возбуждения.

Опустим правые нелинейные части уравнения (1) и будем конструировать решение [1] для уравнения

$$\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = \gamma^2 \frac{\partial^2 A}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Преобразуем его к виду

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma^2 \frac{\partial A}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Домножим первое уравнение на  $1/\gamma$  и сложим и вычтем его из второго:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left( A + \frac{1}{\gamma} u \right) + \gamma \frac{\partial}{\partial x} \left( A + \frac{1}{\gamma} u \right) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( A - \frac{1}{\gamma} u \right) - \gamma \frac{\partial}{\partial x} \left( A - \frac{1}{\gamma} u \right) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Если ввести обозначения

$$A + \frac{1}{\gamma} u = Y; A - \frac{1}{\gamma} u = Z, \quad (5)$$

то эти уравнения записываются в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial t} + \gamma \frac{\partial Y}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial Z}{\partial t} - \gamma \frac{\partial Z}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

который позволяет сразу выписать их общее решение

$$Y = f(x - \gamma t), Z = g(x + \gamma t). \quad (7)$$

Здесь  $f$  и  $g$  – произвольные дифференцируемые функции.

Величины  $Y, Z$ , определенные формулами (5), носят название римановых инвариантов. Формула  $A + \frac{1}{\gamma}u = f(x - \gamma t)$  показывает, что величина  $Y = A + \frac{1}{\gamma}u$  остается постоянной вдоль прямой  $x - \gamma t = \text{const}$ , т. е. график функции  $Y(x)$  с течением времени перемещается вправо со скоростью  $\gamma$ . Аналогично, величина  $Z = A - \frac{1}{\gamma}u$  постоянна вдоль прямой  $x + \gamma t = \text{const}$ , и ее график перемещается влево с той же скоростью. Это дает основание для того, чтобы назвать  $\gamma$  скоростью распространения волн возбуждения. Линии  $x \mp \gamma t = \text{const}$  на плоскости  $x, t$  называются характеристиками системы (3).

Рассмотрим следующую простейшую задачу. Пусть в момент времени  $t=0$  начальные условия имеют вид

$$\begin{aligned} u_0(x) &= u_1; A_0(x) = A_1, \text{ при } x < x^*, \\ u_0(x) &= u_2; A_0(x) = A_2, \text{ при } x > x^*, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $u_1, u_2, A_1, A_2$  — некоторые постоянные, причем выполнено одно из неравенств:  $u_1 \neq u_2$  или  $A_1 \neq A_2$ , или оба одновременно. Не обращая пока внимания на разрывный характер начальных данных, будем конструировать решение. Учитывая постоянство риманова инварианта  $Y = A + \frac{1}{\gamma}u$  вдоль характеристик

$x - \gamma t = \text{const}$  и инварианта  $Z = A - \frac{1}{\gamma}u$  вдоль характеристик  $x + \gamma t = \text{const}$ , мы приходим к структуре, изображенной на рис. 1.

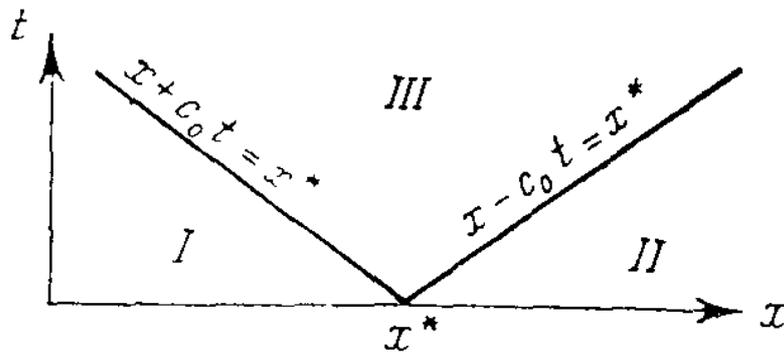


Рис. 1. Характеристики системы (3)

В области I и II имеем

$$\begin{aligned} \bar{A} + \frac{1}{\gamma_{1,2}} \bar{u} &= A_{1,2} + \frac{1}{\gamma_{1,2}} u_{1,2}, \\ \bar{A} - \frac{1}{\gamma_{1,2}} \bar{u} &= A_{1,2} - \frac{1}{\gamma_{1,2}} u_{1,2}, \end{aligned}$$

откуда следует, что в области I  $\bar{u} = u_1, \bar{A} = A_1$ , а в области II  $\bar{u} = u_2, \bar{A} = A_2$ , т. е. сохраняются невозмущенные «левые» и «правые» величины.

Наконец, в области III величины  $u, A$  могут быть найдены из уравнений

$$\begin{aligned}\bar{A} + \frac{1}{\gamma_1} \bar{u} &= A_1 + \frac{1}{\gamma_1} u_1, \\ \bar{A} - \frac{1}{\gamma_2} \bar{u} &= A_2 - \frac{1}{\gamma_2} u_2.\end{aligned}$$

Сделаем замены

$$d_0 = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}; \quad d_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}; \quad d_2 = \frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}; \quad d_3 = \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2}; \quad d_4 = \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2}.$$

$$\bar{u} = u_1 d_2 + u_2 d_1 + A_1 d_0 - A_2 d_0,$$

$$\bar{A} = A_1 d_1 + A_2 d_2 + u_1 d_3 - u_2 d_3.$$

Данная модель имитирует распространение нервного импульса по неоднородному волокну. Дополнив эту модель моделями ветвления, синапса и нейрона, можно моделировать большие агломерации нейронов и, изучая их совместную работу, разрабатывать более эффективные алгоритмы обучения.

### Список литературы

1. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М., 1976 г., 400 стр. с илл.
2. Соколов Е. Н., Шмелев Л. А., Нейробионика. Организация нейроподобных элементов и систем. М.: Наука, 1983
3. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. – М.: Мир, 1990. – 239 с., ил.

УДК 519.7

С.Ф. Тюрин<sup>1</sup>, О.В. Грекова<sup>1</sup>, А.В. Греков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

<sup>2</sup>Пермский военный институт внутренних войск МВД РФ, Пермь

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ДЛЯ ПОИСКА ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПОЛНЫХ ТОЛЕРАНТНЫХ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ЧЕТЫРЕХ АРГУМЕНТОВ

### Аннотация

Описано получение вектора булевой функции четырёх переменных, сохраняющего функциональную полноту в смысле теоремы Поста в случае отказов. В отличие от известного подхода, учитывающего модель однократных константных отказов, уравнение толерантности строится с учётом модели замыкающих переменных.

## Введение

В [1] предлагается создавать «живучие», «катастрофоустойчивые» системы путем сохранения хотя бы базисных функций для заданной модели отказов, позволяющих вычислять исходные за большее время после соответствующей реконфигурации. Предложена концепция функционально-полного толерантного (ФПТ) элемента, сохраняющего функциональную полноту при заданной модели отказов [1, 5, 6].

Такой подход к элементной базе (например, к программируемым логическим схемам – ПЛИС) соответствует тенденциям своего рода ресурсосбережения в области отказоустойчивости – использование даже ограниченных функциональных возможностей аппаратуры с отказами с целью адаптации к ним.

В [2, 3] показано, как строится вектор ФПТ функции четырёх переменных с учётом заданной классической модели однократных константных и инверсных отказов. Однако, модель отказов типа «Замыкания с доминированием», «Монтажное И, ИЛИ», «Монтажное И, ИЛИ с доминированием» [4] не учитывалась в выводе функционально-полных толерантных функций. Предлагается более реалистичная комбинированная модель с учетом как однократных константных отказов, так и замыканий переменных.

## Обеспечение свойств не сохранения констант и не монотонности в смысле теоремы Поста исходного булева вектора

Построим вектор – шаблон для четырёх переменных, модификации которого с учётом доработанной модели позволят получить уравнения ФПТ функций. Для достижения свойств не сохранения констант не должно быть единицы в пятнадцатом разряде, но должна быть единица в нулевом разряде. Так как пятнадцатому разряду по правым заменам (для однократных константных отказов) смежны разряды, отстоящие от него на 1, 2, 4, 8 бит (т.е. разряды 14, 13, 11, 7), поэтому в этих разрядах должны быть нули. Нулевому разряду смежны по левым заменам разряды, отстоящие от него на 1, 2, 4, 8 бит, т.е. разряды 1, 2, 4, 8. В этих разрядах должны быть единицы. Таким образом, получаем вектор (рис. 1):

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	~	1	~	~	0	1	~	~	0	~	0	0	0

Рис. 1. Вектор предполагаемой функции

Поскольку бит 15 всегда остается равен нулю, а бит 0 всегда единице, то полученная функция немонотонна, т.е. "резервирование" не сохранения констант 0,1 автоматически гарантирует и не монотонность.

**Обеспечение свойства нелинейности в смысле теоремы Поста вектора предполагаемой ФПТ функции для  $n=4$  с учётом комбинированной модели отказов**

Построим таблицу линейных функций четырех аргументов. С учетом наличия четырех переменных и свободного члена такая таблица содержала бы  $2^5=32$  строки. Очевидно, вследствие того, что на нулевом наборе аргументов предполагаемая функция равна 1, то рассмотрению подлежат линейные функции со свободным членом, равным 1 (таблица 1).

Таблица 1

*Возможные линейные функции четырех аргументов со свободным членом, равным единице*

$$c_0 \oplus c_1x_1 \oplus c_2x_2 \oplus c_3x_3 \oplus c_4x_4$$

Коэффициент					Вид полинома
$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	
1	0	0	0	0	1
1	0	0	0	1	$1 \oplus x_4$
1	0	0	1	0	$1 \oplus x_3$
1	0	0	1	1	$1 \oplus x_3 \oplus x_4$
1	0	1	0	0	$1 \oplus x_2$
1	0	1	0	1	$1 \oplus x_2 \oplus x_4$
1	0	1	1	0	$1 \oplus x_2 \oplus x_3$
1	0	1	1	1	$1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4$
1	1	0	0	0	$1 \oplus x_1$
1	1	0	0	1	$1 \oplus x_1 \oplus x_4$
1	1	0	1	0	$1 \oplus x_1 \oplus x_3$
1	1	0	1	1	$1 \oplus x_1 \oplus x_3 \oplus x_4$
1	1	1	0	0	$1 \oplus x_1 \oplus x_2$
1	1	1	0	1	$1 \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus x_4$
1	1	1	1	0	$1 \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus x_3$
1	1	1	1	1	$1 \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4$

Анализ показывает, что в отличие от модели константных отказов возникают дополнительные условия относительно инверсий переменных, соответствующих переменным доминирования. Остальные линейные вектора всегда ортогональны модификациям.

**Обеспечение не самодвойственности ФПТ функции**

Необходимо получить такой вектор, который был бы не самодвойственен и все его модификации оставались бы не самодвойственны. Учитывая все модели отказов, получим логическое уравнение, описывающее условия сохранения функциональной полноты при комбинированной модели отказов для четырех переменных:

$$\begin{aligned}
 & (a_6 \vee a_{10} \vee a_{12})(a_5 \vee a_9 \vee a_{12})(a_3 \vee a_9 \vee a_{10}) \\
 & (a_3 \vee a_5 \vee a_6)(\bar{a}_3 \vee \bar{a}_5 \vee \bar{a}_9)(\bar{a}_3 \vee \bar{a}_6 \vee \bar{a}_{10}) \\
 & (\bar{a}_5 \vee \bar{a}_6 \vee \bar{a}_{12})(\bar{a}_9 \vee \bar{a}_{10} \vee \bar{a}_{12}) \\
 & (a_3 a_{12} \vee \bar{a}_3 \bar{a}_{12})(a_6 a_9 \vee \bar{a}_6 \bar{a}_9)(a_5 a_{10} \vee \bar{a}_5 \bar{a}_{10}) = 1
 \end{aligned} \tag{1}$$

Получим решения уравнения (1):

$$(a_3 a_5 \bar{a}_6 \bar{a}_9 a_{10} a_{12}) \tag{2};$$

$$(\bar{a}_3 a_5 a_6 a_9 a_{10} \bar{a}_{12}) \tag{3};$$

$$(\bar{a}_3 \bar{a}_5 \bar{a}_6 \bar{a}_9 a_{10} \bar{a}_{12}) \tag{4};$$

$$(a_3 \bar{a}_5 a_6 a_9 \bar{a}_{10} a_{12}) \tag{5};$$

$$(a_3 a_5 \bar{a}_6 \bar{a}_9 \bar{a}_{10} a_{12}) \tag{6};$$

$$(\bar{a}_3 \bar{a}_5 a_6 a_9 a_{10} \bar{a}_{12}) \tag{7}.$$

Сравнивая полученные решения с решениями относительно только константной модели отказов [1, 2], можно сделать вывод о соответствии бит решений выражениям (2-7). То есть введение дополнительных ограничений модели замыканий только доопределяет несущественные разряды, не изменяя существенных.

Рассмотрим решение  $\bar{a}_3 \bar{a}_5 \bar{a}_6 \bar{a}_9 \bar{a}_{10} a_{12}$ . Получим карту Карно (рисунок 2).

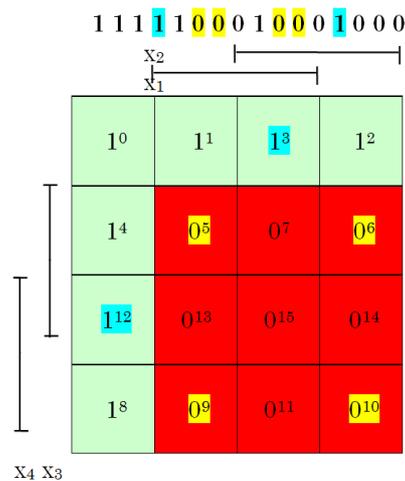


Рис. 2. Карта Карно для ФПТ вектора для решения  $\bar{a}_3 \bar{a}_5 \bar{a}_6 \bar{a}_9 \bar{a}_{10} a_{12}$

Такой карте Карно соответствует ФПТ функция  $\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_4$ , которая была получена ранее только для модели однократных константных отказов [1, 2]. Получим аналогично остальные ФПТ функции (таблица 2).

Таблица 2

ФПТ функции для комбинированной модели отказов	
№	ФПТ функция
1	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_4$
2	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_4 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_4 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3 = (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_4)(\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)$

3	$\overline{x_2 x_4} \vee \overline{x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_4} \vee \overline{x_2 x_3} = (\overline{x_1} \vee \overline{x_2})(\overline{x_3} \vee \overline{x_4})$
4	$\overline{x_1 x_3} \vee \overline{x_2 x_4}$
5	$\overline{x_1 x_2} \vee \overline{x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_4} \vee \overline{x_2 x_3} = (\overline{x_1} \vee \overline{x_3})(\overline{x_2} \vee \overline{x_4})$
6	$\overline{x_1 x_4} \vee \overline{x_2 x_3}$

### Выводы

В комбинированной модели отказов имеются 6 решений в отличие от модели однократных константных отказов, в которой было 20 решений. Все 6 полученных решений полностью определены относительно разрядов 3,12, 6,9, 5,10. Решение  $a_3 \overline{a_5} \overline{a_6} \overline{a_9} \overline{a_{10}} a_{12}$  соответствует ФПТ функции  $\overline{x_1 x_2} \vee \overline{x_3 x_4}$ , полученной ранее только для модели однократных константных отказов. Проверка функциональной полноты новых остаточных функций для модели замыканий показывает их соответствие теореме Поста [5, 6].

### Список литературы

1. Тюрин С.Ф. Функционально-полные толерантные булевы функции //Наука и технология в России.- № 4.- 1998.- С.7.10.
2. Тюрин С.Ф. Проблема сохранения функциональной полноты булевых функций при «отказах» аргументов //Автоматика и телемеханика. 1999. № 9. С.176-186.
3. Тюрин С.Ф., Несмелов В.А., Харитонов В.А. и другие. Программируемое логическое устройство. Патент РФ № 2146840. Опубл. БИ № 8. 2000 г.
4. Michael L. Bushnell, Vishwani D. Agrawal. Essentials of electronic testing for digital, memory and mixed-signal VLSI circuits, Kluwer Academic Publishers. 2000. - 690 p.
5. Тюрин С.Ф., Греков А.В., Набатов А.В. Парирование отказов комбинационных схем в функционально-полном толерантном базисе. В мире научных открытий. 2012. № 8. С. 38-64.
6. Тюрин С.Ф., Греков А.В., Громов О.А. Функционально-полный толерантный элемент. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 115. С. 24-30.

## АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ САМОСИНХРОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПОЛНЫХ ТОЛЕРАНТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

### Аннотация

Предлагается элемент для создания отказоустойчивой аппаратуры управления на основе совмещения ФПТ-элемента и строго самосинхронного подхода.

### Введение

Устройство управления (УУ) – формирует и подает во все блоки машины в нужные моменты времени определенные сигналы управления. В соответствии с выполняемыми функциями, блоки управления двигателями, шифропроцессорами и другой важной аппаратуры должны обладать свойствами отказоустойчивости и быстродействия. Самосинхронный функционально-полный толерантный элемент – это результат совмещения отказоустойчивого ФПТ-элемента и строгосамосинхронного подхода. Основой для этого совмещения стало то, что самосинхронные схемы показывают лучшее быстродействие, нежели синхронные, а так же обладают 100% самопроверяемостью. Самопроверяемость, основанная на применении индикаторов и  $G$ -триггеров, позволяет использовать методику скользящего резервирования с восстановлением логики без использования мажоритаров.

Однако применение самосинхронного подхода накладывает дополнительное требование на создаваемую схему – требование полумодулярности (корректности). В строго самосинхронных схемах недопустимо наличие тупиковых и конфликтных состояний, а также замкнутых циклов. Анализом схем на полумодулярность занимается подсистема *Tranal САПР Forcage*. Для анализа необходимо задать схему на языке, используемом подсистемой. В общем виде функциональную схему строгосамосинхронного элемента можно представить следующим образом, рис.1.

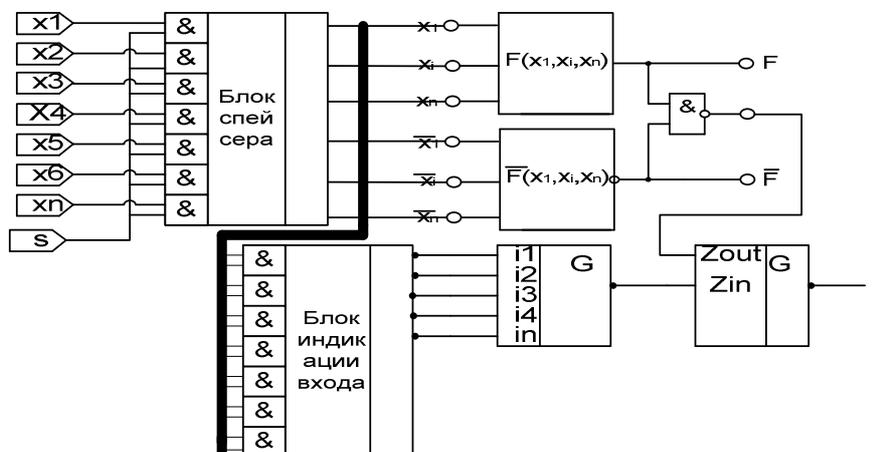


Рис. 1. Общий вид строгосамосинхронных схем

### Элементы синтаксиса языка САПР *Forcage*:

- = Отделяет левую и правую части уравнения
- ; Разделяет уравнения
- ^ Инверсии (после названия сигнала или перед всем правая часть уравнения)
- \* Конъюнкция
- | Дизъюнкция
- \$ Отделяет уравнений из начального состояния
- (), Чтобы ограничить скобки часть логическое выражение
- \ \ Разместить комментарий

### Представление схемы в САПР *Forcage*:

```
\ssfpt-element\  
L0 = 0;L1 = 1; N0 = 0 ; N1 = 1; \Добавляем константы инверсных переменных\  
\ Входы - спейсер 0 \  
X1=z~*L0; \z – это наш блок индикации, z~ - инверсный ему сигнал (спейсер)\  
X2=z~*L1; \Если z=0, то элемент принимает следующее слово, если z=1, то подается набор  
гашения\  
X3=z~*L0;X4=z~*L1;  
X5=z~*N1;\x5-x8, это инверсные переменные, с учетом спейсера\  
X6=z~*N0;X7=z~*N1;X8=z~*N0;  
\ Индикатор входов \  
I1 =^ X1 | X5;I2 =^ X2 | X6;I3 =^ X3 | X7;I4 =^ X4 | X8;  
I5B =^ I1*I2*I3*I4 | I5(I1 | I2 | I3 | I4);  
I5 =^ I5B;\C-element, на несколько входов\  
\ Выходы - спейсер 1 \  
Y1 =^ X1*X3 | X1*X4 | X2*X3 | X2*X4; \основной канал, ФПТ-элемент\  
Y2 =^ X5*X6 | X7*X8; \инверсный ФПТ-элемент\  
\ Индикатор выходов \  
Z =^ Y1*Y2; ZB =^ Z;  
\ Общий индикатор \  
IB =^ I5*ZB | I(I5 | ZB);  
I =^ IB; \C-element \  
\ Сигнал управления \  
z~ = I;  
\начальное состояние I1_0, набор гашения\  
$Y1*Y2*I1*I2*I3*I4*I5*ZB*I*Z^*z~^
```

В *Tranal* схема представляется в виде модели Маллера. В модели Маллера переменная  $a_i$  возбуждена в некотором состоянии если  $a_i$  не равно  $f_i(a_i)$  и устойчива в противном случае. Из состояния  $\alpha$  модель может перейти в состояние  $\beta$ , которое отличается от  $\alpha$  значениями каких – либо переменных, т.е. наличие петель здесь невозможно. Для анализа функционала схемы предлагается применять САПР *Quartus 2 v.9.0*, он позволяет задать исходную схему на языке *VHDL*, и проанализировать ее с получением временных диаграмм.

Однако группа ученых из ИПИ РАН, которые продолжают работу Варшавского в области асинхронной логики, отмечают, что ПЛИС не применимы для реализации самосинхронного подхода.

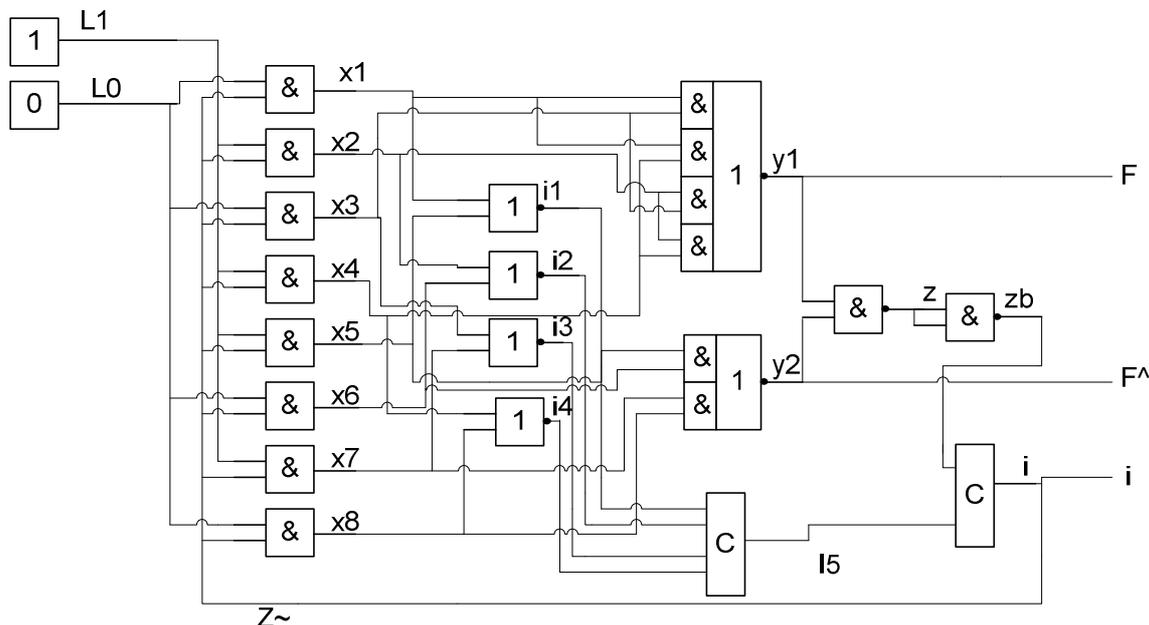


Рис. 2. Строго самосинхронный ФПТ-элемент

Теперь получим временную диаграмму работы СС ФПТ-элемента с помощью ModelSim, рис.3.

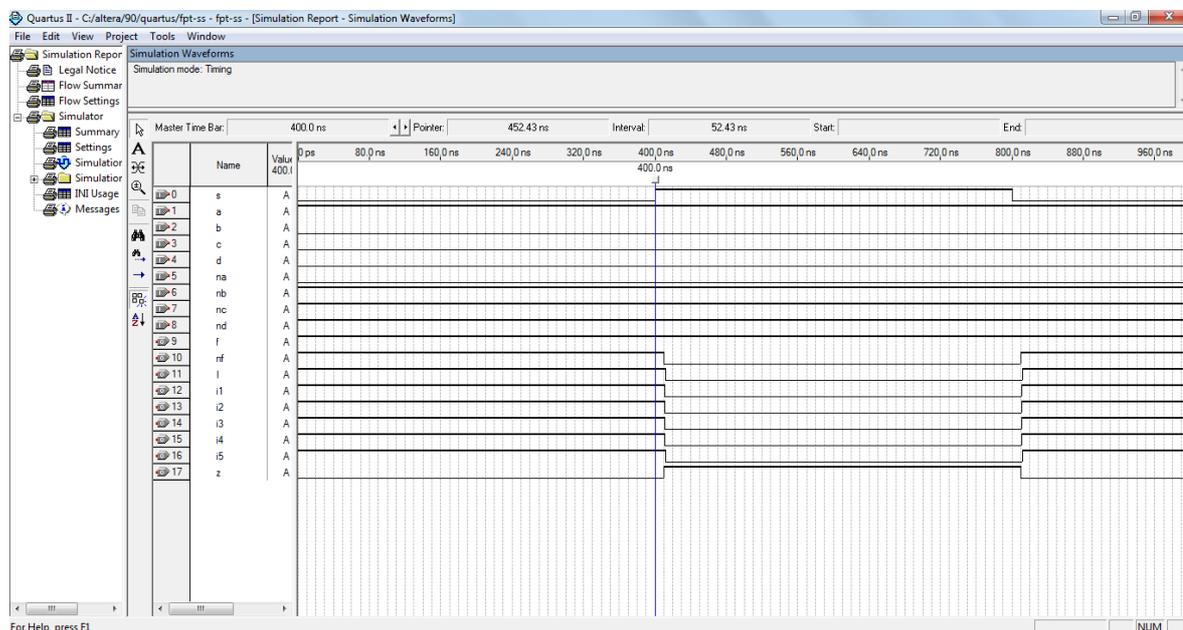


Рис. 3. Временная диаграмма работы СС ФПТ-элемента

Таким образом создание комбинационных схем в соответствии с строго самосинхронным подходом состоит из следующих этапов:

1. Синтез основного канала комбинационной функции
2. Синтез инверсного канала комбинационной функции

3. Синтез блока спейсера
4. Синтез блока индикации сигналов (вход-выход)
5. Последовательное соединение блоков для синхронизации
6. Проверка полумодулярности полученной схемы
7. Получение функциональных параметров схемы

### **Заключение**

По результатам создания ИПИ РАН СБИС строго самосинхронного микропроцессора [3] применение самосинхронного подхода позволяет:

- Снизить уровень энергопотребления – схема потребляет энергию только при переключении, то есть когда идут вычисления.
- Повысить быстродействие – отказ от генератора тактовой частоты позволяет схеме работать в режиме максимального быстродействия, переключения в схеме зависят только от свойств транзисторов
- Использовать 100% самопроверяемость – данное свойство предлагается использовать при построении схем со скользящим резервированием и восстановлением логики

В сочетании с ФПТ элементом, все это позволит строить отказоустойчивую аппаратуру с возможностью восстановления логики. Данный подход предлагается использовать при синтезе комбинационных схем и схем управления на жесткой логике с повышенными требованиями к отказоустойчивости и быстродействию.

### **Список литературы**

1. Аperiodические автоматы / под.ред В.И.Варшавского,,: издательство “Наука” главная редакция физико-математической литературы: Москва, 1974г.
2. Надежность строго самосинхронных схем, Электронный ресурс URL:-[<http://www.dsol.ru/uploads/pdf/nadejnost.pdf>]
3. Создание СБИС строгосамосинхронного микропроцессора, электронный ресурс URL:-[<http://www.dsol.ru/uploads/pdf/ssm.pdf>]
4. Каменских А.Н., Самосинхронный функционально-полный толерантный элемент, Электронный ресурс URL:-[[http://www.ucom.ru/doc/conf/2012\\_12\\_28\\_7.pdf](http://www.ucom.ru/doc/conf/2012_12_28_7.pdf)]
5. Тюрин С.Ф. Функционально-полные толерантные булевы функции //Наука и технология в России.- № 4.- 1998.
6. Система автоматизации проектирования самосинхронных схем FORCAGE. Руководство пользователя. Версия 3.0. ИПИ РАН, ТОО "ТРАССА". 1994.

## К ВОПРОСУ ОБ ИМИТАЦИИ РАБОТЫ ГРУЗОВОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ

### Аннотация

В данной работе описана имитационная модель работы грузовой железнодорожной станции, основанная на совместном использовании аппарата теории немарковских процессов и технологического анализа, которая позволяет учесть влияние случайных факторов.

### Введение

Грузовые станции являются важнейшим элементом железнодорожного транспорта. В новых экономических условиях они призваны сыграть ключевую роль в деле привлечения грузов к перевозкам. От работы этих станций непосредственно зависит финансовое положение всей отрасли в целом. Поэтому улучшение работы грузовых станций – огромный резерв повышения эффективности функционирования всего железнодорожного транспортного комплекса.

Для совершенствования работы указанных станций полезно использовать методы системного анализа, в частности, математическое и имитационное моделирование, поскольку проведение натурального эксперимента в условиях реально работающей станции практически невозможно. В данной работе на основе построенной в [1] математической модели разработана имитационная модель грузовой железнодорожной станции общего пользования и реализующая ее программная система.

Для моделирования входящего вагонопотока при построении имитационной модели использовалась технология, предложенная в [2], которая была модифицирована за счет уточнения закона распределения количества вагонов в поступающих составах. В следующем разделе рассматривается процесс разгрузки вагонов.

### Время выгрузки

Согласно [3] время выгрузки определяется по следующей формуле:

$$T = t_{подг} + \frac{n}{m} t_{груз} + t_{закл}, \quad (1)$$

где  $t_{подг}$  – время на подготовительные операции;

$t_{груз}$  – время на выгрузку груза из вагона посредством механизма;

$t_{закл}$  – время на заключительные операции;

$n$  – количество вагонов;

$m$  – число одновременно разгружаемых вагонов при использовании нескольких механизмов.

Время на выгрузку груза из вагона определяется по формуле

$$t_{\text{выз}} = \frac{60q_B}{\Pi} + t_{\text{всп}}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{всп}}$  – затраты времени на вспомогательные операции в процессе выгрузки, не входящие в рабочий цикл;

$q_B$  – средний вес (масса) груза в вагоне;

$\Pi$  – производительность погрузочно-разгрузочного механизма.

Производительность погрузочно-разгрузочного механизма

$$\Pi = \frac{3600q_{\text{ц}}}{t_{\text{ц}}}, \quad (3)$$

где  $q_{\text{ц}}$  – средняя масса груза, погружаемого за 1 цикл;

$t_{\text{ц}}$  – производительность 1 цикл.

В данной работе рассматривается пример выгрузки тяжеловесных грузов из полувагона башенным краном с полувагонами и сборными железобетонными изделиями [3]. В этом случае получим следующие нормативные значения:

$$\Pi = 47.4 \text{ т/ч}, \quad t_{\text{выз}} = 83.5 \text{ мин}, \quad T = 91.5 \text{ мин} = 1.53 \text{ ч}.$$

На практике в процессе выгрузки оказывают существенное влияние случайные факторы, т.е. процесс выгрузки грузовых вагонов является случайным процессом [4]. Результаты исследования показывают, что для описывания распределения времени выгрузки лучше всего подходит показательный закон с параметром  $\lambda = 1/a$ . Так как время выгрузки, рассчитанное по формуле (1), является теоретическим (идеальным), то реальное время выгрузки, как правило, больше. Поэтому предполагается, что  $a = 6T/5$ , соответственно,  $\lambda = 5/6T$ .

### Имитационная модель

Авторами установлено в ходе исследования, что количество вагонов в прибывающих поездах подчиняется комбинированному закону распределения (нормальный + равномерный), в процессе моделирования используются два генератора. Первый генератор работает по усеченному нормальному закону с параметрами  $a = 35.51$  и  $\sigma = 8.62$ . Второй генератор работает по исправленному равномерному дискретному закону с параметрами  $a = 36$  и  $b = 42$ .



Рис. 1. Процесс генерирования количества вагонов

Процесс генерирования происходит два этапа: в первом этапе первый генератор формирует случайное значение. Если оно меньше либо равно 44, то это число округляется и принимается в качестве количества вагонов в очередной подаче. Если же оно больше 44, то второй генератор формирует другое случайное значение, оно принимается в качестве количества вагонов в очередной подаче. Реализация данной процедуры дает возможность разыгрывания количества вагонов в прибывающих поездах.

Общее время выгрузки всех вагонов поезда рассматривается как время обслуживания. Оно не только зависит от времени выгрузки  $T$ , но и от количества вагонов в разгружаемых поездах. Поэтому время прибытия поездов зависит не только от времени выгрузки, но и количества вагонов в разгружаемых поездах. Время выгрузки описывается показательным законом распределения с параметром  $a = 6T / 5$ , где  $T$  общее время выгрузки, рассчитанное по формуле (1). Таким образом, в зависимости от текущего состояния грузовой станции генерируется время прибытия поезда.

### **Программная реализация**

На основе имитационной модели создана программная система, которая выполняет следующие функции:

- генерирование количества вагонов в прибывающих поездах;
- генерирование время прибытия поезда; проверка состояния станции;
- отображение процесса выгрузки в графическом виде;
- отображение данных процесса выгрузки в таблицах;
- отображение результата генерирования в таблицах и сохранение в \*.xls файл.

Для начала процесса моделирования нужно ввести исходные данные, такие: количество суток, количество путей и разгрузочных бригад (и сколько из них уже заняты), время выгрузки, интенсивности, задать ряд настроечных параметров. При моделировании выполняются три процесса: выгрузка грузов из вагонов, проверка состояния станции и поступление поезда. Процессы моделирования повторяются до тех пор, пока количество смоделированных суток не станет равным заданному значению. Выходной информацией является количество вагонов в прибывающих поездах, время поступления поезда и состояние станции.

Выполняя представленные выше функции, программная система дает пользователю возможность выбрать законы распределения и их параметры. Для генерирования количества вагонов можно выбрать нормальный или комбинированный закон, после чего задать значения параметров нормального закона либо определить их по умолчанию. Время выгрузки можно считать либо линейно зависящим от числа вагонов, либо подчиняющимся показательному закону.

Предполагается, что работы на линиях обслуживания выгрузки производятся независимо друг от друга, и как только все вагоны на линии разгружены, можно принять новый состав.

Процесс моделирования отображается в табличном и графическом виде. Выходные данные представляются в табличном виде и можно их сохранить в \*.xls файл.

### **Заключение**

Моделирование работы грузовой станции, основанные на совместном использовании аппарата теории немарковских процессов и технологического анализа, позволил идентифицировать, а также качественно и количественно оценить показатели процесса переработки вагонопотока с учётом влияния случайных факторов. При этом полученные вероятностные и технологические показатели хорошо согласуются и могут характеризоваться, как достоверные.

На основе имитационной модели создана программная система, которая описывает работы грузовой станции, отслеживать количество вагонов на станции, состояние разгрузки и время прибытия поезда. С помощью программной системы станции повышается эффективность управления работой грузовой станции.

### **Список литературы**

1. Казаков А.Л., Фу Ф.Г. Применение стохастических моделей с многоуровневой структурой для исследования микрологистических систем на железнодорожном транспорте // Труды XVI Байкальской Всероссийской конференции. Т. 2. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2011. С. 93-98.

2. Казаков А.Л., Маслов А.М. Построение имитационной модели входящего на грузовую станцию вагонопотока // Транспорт Урала. 2009. №2. С. 17-21.

3. Указание МПС РФ «О методических рекомендациях по определению технологического времени на выполнение погрузочно-разгрузочных операций с грузовыми вагонами» Министерство путей сообщения РФ 05.03. 2001 г. № Е-313У.

4. Правдин Н.В., Дыканюк М.Л., Негрей В.Я. Прогнозирование грузовых потоков. - М.: Транспорт, 1987. - 247 с.

## **СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МНОГОСВЯЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ**

### **Аннотация**

Приводятся принципы организации оптимальной по быстродействию системы управления многосвязными приводами, даны рекомендации по выполнению позиционирования, торможения, движению с установившейся скоростью и переменным темпом, разработаны алгоритмы адаптивного управления

Производительность технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий в значительной степени определяется техническими возможностями систем многосвязных электроприводов (ЭП), а также их правильным использованием в конкретных технологических процессах.

В настоящее время в технологической установке электродугового плазменного нанесения покрытий нашли широкое применение асинхронные ЭП, производительность которых в 2-3 раза выше [1], что обусловлено главным образом снижением времени на позиционирование и увеличением времени работы по жесткой программе. Время на позиционирование можно значительно сократить, если осуществлять оптимальное по быстродействию управление всеми многосвязными ЭП одновременно.

Проектирование единой системы управления для всех многосвязных ЭП потребовало резко увеличить производительность центральных процессоров или перейти к специализированным процессорам с объектно-ориентированной системой команд, адаптированной к решению задач цифрового регулирования в реальном масштабе времени. Ряд фирм (*Intel, Texas Instruments, Analog Devices* и др.) выпускают на рынок *DSP*-микроконтроллеры для систем управления асинхронными электродвигателями (ЭД) на базе процессоров для обработки сигналов. Они не только обеспечивают требуемую производительность центрального процессора (более 40 млн.оп./сек.), но и содержат ряд встроенных периферийных устройств, предназначенных для оптимального сопряжения контроллера с силовыми преобразователями и датчиками обратных связей. Среди встроенной периферии контроллера особое место занимает генератор периодических сигналов, обеспечивающий алгоритмы векторной широтно-импульсной модуляции. Кроме прямого цифрового управления силовым преобразователем ЭП *DSP*-микроконтроллер реализует дополнительные функции поддержки интерфейса с пользователем (через пульт оперативного управления), а также управляет выполнением технологических операций. В структуру микроконтроллера также входит адаптивный регулятор по технологическим переменным и генератор, управляющий часами реального времени. Системы управления с такими контроллерами позволяют реализовать адаптивные алгоритмы практически любой сложности.

Синтез систем управления многосвязными ЭП осуществляется с учетом ограничений на фазовые координаты и предельные динамические возможности каждого ЭП (максимальная скорость, ускорение), а также с учетом требований всего технологического оборудования. Алгоритмы релейно-позиционного управления учитывают возможные отклонения от оптимальной траектории движения и обеспечивают разгон и торможение за минимальное время с учетом принятых ограничений без перерегулирования по скорости и длины пути.

Определение оптимальных по быстродействию алгоритмов релейно-позиционного управления с учетом перечисленных требований и ограничений вызывает значительные трудности при использовании математического аппарата вариационного исчисления, поэтому рационально использовать численные методы. Широкие возможности в этом плане дают численные методы динамического программирования, которые в общем случае можно рассматривать как метод составления программ для численного решения задачи оптимизации на микроконтроллерах системы управления ЭП [2].

Синтез алгоритмов управления на основании метода динамического программирования предполагает использование численного решения сложных дифференциальных уравнений известными методами, например методом Эйлера [3]. В этом случае первая и вторая производные от скорости привода, соответственно ускорение и рывок, могут быть представлены в виде приращений скорости за заданный интервал интегрирования. При расчетах интервал интегрирования постоянен, поэтому о величине ускорения во время рывка или торможения можно судить по приращениям скорости вала ЭД.

Режимы работы релейно-позиционного ЭП бывают продолжительными и циклическими, которые, в свою очередь, подразделяются на повторно-кратковременные и перемежающиеся. Для продолжительных режимов закон управления ЭП выбирается с расчетом на полную нагрузку. Для циклических режимов задается период, в течение которого скорость и нагрузка изменяются, и можно выбирать оборудование ЭП с запасом по нагрузке.

При скачкообразном задании скорости вращения разгон электродвигателя идет с максимально допустимым током. В быстродействующих ЭП главного движения с асинхронными двигателями, имеющими малые электромагнитные постоянные, без внесения большой погрешности можно пренебречь электромагнитными процессами. Рассмотрим для этого случая движение исполнительного механизма (ИМ) асинхронного электродвигателя, динамика которого описывается системой дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} d\omega_p/dt = (M_{эл} - M_c)/J \\ d\theta_p/dt = \omega_p \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\omega_p$  – механическая угловая частота вращения ротора, рад/с;  $J$  – момент инерции вращающихся масс ЭП ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ );  $M_{эл}$  – электромагнитный момент (Н м);  $M_c$  – момент сопротивления на валу ротора (Н м);  $\theta_p$  – механический угол поворота ротора, измеряемый в геометрических радианах.

Для релейно-импульсного регулирования напряжения нетрудно получить

$$M_c(t) = \left( \frac{U}{K\Phi} - \varepsilon(t)T_M e^{\frac{t}{T_M}} \right) \frac{(K\Phi)^2}{R_{эк}}, \quad (2)$$

где  $M_c(t)$  – момент сопротивления на валу ротора;  $U$  – напряжение на статоре при замкнутом ключе силового преобразователя;  $\varepsilon(t)$  – ускорение на валу ЭД. По сигналам с датчика положения определяем закон изменения ускорения, а далее в соответствии (2) вычисляем  $M_c$  при заданной скорости и ускорения.

Пусть приращения скорости  $\Delta\omega_1^1$  и  $\Delta\omega_1^2$  в интервале интегрирования определяют ускорение. Ограничение на рывок на первом интервале выбирается так, чтобы ускорение достигло своего максимума за  $n$  шагов интегрирования

$$\Delta\omega_1^1 = n \cdot \Delta\omega_1^2. \quad (3)$$

Процесс позиционирования разбивается на участки разгона с заданной скоростью  $\omega_{зад}$ , движение с этой скоростью, далее торможение. При разгоне со скоростью  $\omega_{зад}$  за минимальное время с учетом перечисленных ограничений система управления определяет требуемое приращение скорости

$$\Delta\omega = \omega_{зад} - \omega_k, \quad (4)$$

где  $\omega_k$  – скорость вала ЭП в конце предыдущего интервала интегрирования.

Далее модуль этого приращения  $|\Delta\omega|$  сравнивается с приращением сброса  $\Delta\omega_{сб}$ , которое численно равно изменению скорости за время сброса ускорения до нуля при принятых ограничениях в дискретности расчетов. Если  $|\Delta\omega| > \Delta\omega_{сб}$ , то система осуществляет сравнение  $|\Delta\omega|$  с допустимым приращением скорости за интервал интегрирования и ограничение  $\Delta\omega$  на допустимом уровне. Если  $|\Delta\omega| < \Delta\omega_{сб}$ , то система сравнивает  $|\Delta\omega|$  с  $\Delta\omega_i^1$  и ограничивает на уровне ускорения, сброс которого до нуля возможен за один интервал интегрирования.

На следующем этапе система управления ЭП определяет требуемое приращение к приращению скорости  $\Delta(\Delta\omega)$  путем вычитания приращения скорости на предыдущем шаге из нового и в случае превышения им значения  $\Delta\omega_i^2$  ограничивает на уровне допустимого рывка.

Следовательно, новое приращение скорости и скорость для очередного шага интегрирования система определяет соответственно из выражений

$$\Delta\omega_i = \Delta\omega_i^0 + \Delta(\Delta\omega_i), \quad (5)$$

$$\omega_i = \omega_i^0 + \Delta\omega_i, \quad (6)$$

где  $\Delta\omega_i^0$  – приращение скорости на предыдущем шаге интегрирования.

Путь проходимый исполнительным механизмом (ИМ) за первый шаг интегрирования при линейном нарастании скорости, определяется уравнением

$$l_1 = \left( \omega_1^0 + \frac{\Delta\omega_1}{2} \right) \Delta t. \quad (7)$$

Ожидаемое время рывка или торможения  $t_d = v/a$  определяется для всех случаев, где есть ограничения на скорость и ускорение. Если задано полное время движения ИМ  $t_n$ , то вначале рассчитывается его скорость

$$v = a \cdot t_n - \sqrt{(a \cdot t_n)^2 - 4a \cdot l / 2}, \quad (8)$$

где  $l$  – длина всего участка движения,  $l_d = a \cdot t_d^2 / 2$  – длина участков разгона или торможения,  $l_c = l - 2l_d$  – длина участка движения с постоянной скоростью,

$t_c = l/v$  – время движения с постоянной скоростью,  $t_{\Pi} = t_c + 2t_d$  – полное время движения,  $t_{ст} = t_{\Sigma} - t$  – время стоянки.

Если ЭП с винтовым редуктором, то номинальная скорость вращения винта  $\omega_i$  определяется номинальной линейной скоростью  $v_i$ , которая должна отвечать условию  $v_i \geq v$ . Тогда скорость вала ЭП определяет выражение  $\omega = v\omega_i/v_i$ , а мощность при этом должна отвечать условию  $P_i \geq k_3 P_c$ . Здесь  $k_3$  – коэффициент запаса по мощности. Редуктор с винтом радиуса  $r_i$  развивает момент на валу ЭП  $M_i \geq k_3 M'_c$ , где  $M'_c = P_c r_i/v$  – статический момент сопротивления. После выбора редуктора следует рассчитать его передаточное число  $i = \omega_i r_i/v_i$  и моменты сопротивления суппорта редуктора при разгонах  $M'_{д1} = M'_c + mar_i/\eta_p$  и при торможениях  $M'_{д2} = M'_c - mar_i\eta_p$ .

Пусть скорость вращения выходного вала винтового редуктора  $\omega_p = v/r$ , тогда требуемое передаточное число находим из соотношения  $i \leq \omega'_i/\omega_p$ , а требуемая мощность из –  $P_i \geq M_i \omega_p$ . Если же известна полная мощность  $P_p$ , то  $P_i \geq P_p/\lambda_d$ . Здесь  $\lambda_d$  – перегрузочная способность. Параметры редуктора всегда будут определены, если его статическая мощность удовлетворяет соотношению  $P_i \geq k_3 P_c$ , а момент –  $M_i \geq k_3 M'_c$ . Здесь  $M'_c = P_c/\omega_p$ . При значениях  $\omega < \omega_i$  редуктор не развивает номинальной мощности.

Синтез алгоритмов разгона, торможения и движения осуществляется с учетом принятых ограничений и требований. Разгон, торможение, движение с установившейся скоростью выполняются с регулируемым темпом. Подход к точке позиционирования осуществляется с регулируемым ускорением и скоростью, что обеспечивает точную остановку ИМ в заданной точке.

Для микропроцессорной системы управления разработаны многоэтапные и многошаговые релейно-позиционные алгоритмы управления многосвязными ЭП. Для выше описанного технологического оборудования разработаны цифровые многошаговые алгоритмы управления асинхронными многосвязными ЭП.

### Список литературы

1. Хасанов З. М. Автоматизированное технологическое оборудование для электродугового плазменного напыления // Сварочное производство. 2006. № 5. С.44 – 50.
2. Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгаро М.Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
3. Хасанов З. М., Хасанов О.З. Самонастраивающаяся информационно-управляющая система с моделью для динамического управления электроприводами в высокотемпературных технологических процессах // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 12. С. 23–32.

## **АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

### **Аннотация**

Рассмотрены вопросы улучшения динамических свойств многосвязных приводов технологического оборудования. Предлагается алгоритм управления коэффициентом обратной связи токового контура и адаптивный регулятор тока, обеспечивающие наилучшие качественные показатели электроприводов.

Многосвязные электропривода (ЭП) являются неотъемлемой частью технологического оборудования и содержат весьма разнородные элементы, отличающиеся принципом действия, параметрами, методикой проектирования. В зависимости от технологического оборудования к этим электроприводам предъявляют различные требования по кинематической точности, жесткости, люфту, надежности и обязательно – массогабаритным показателям. Для увязки функциональных элементов ЭП в единый комплекс необходимо определить исходные данные к проектированию, обеспечивающие электромагнитную совместимость и выполнение требований к параметрам элементов асинхронного электропривода при минимальных массогабаритных показателях [1].

Совершенствование многосвязных электроприводов, можно развивать в двух направлениях. Первое – это использование перспективных технологий в области материаловедения и преобразовательной техники. Второе направление – это объединение систем управления несколькими ЭП в одну многосвязную систему управления (СУ).

Согласно традиционным методикам на этапе эскизного проектирования частотно-управляемого асинхронного электродвигателя (ЭД) основными расчетными параметрами являются полная электромагнитная мощность, действующее значение тока фазы, сопротивление обмотки статора (активное и индуктивное). Эти же параметры определяют специфику работы СУ.

Номинальные значения КПД, а также коэффициенты трения, скольжения и качения приводятся в соответствующих технических паспортах двигателей. Исходными данными для выбора редукторов служат требуемая мощность (момент), передаточное число и скорость входного вала. Исходными данными для выбора ЭД являются требуемая мощность или момент на валу, момент инерции и скорость, а исходными данными для выбора силового электронного преобразователя (СЭП) – его мощность, ток и напряжение. Система управления должна обеспечить оптимальные статические и динамические характеристики.

Протекание по обмоткам асинхронного ЭД несинусоидальных токов, вследствие эффекта близости и поверхностного эффекта, приводит к увеличению активного сопротивления обмоток ЭД и, как следствие, к дополнительному нагреву. Срок службы ЭД зависит от нагрева его частей и не позволяет при

несинусоидальном токе использовать асинхронный ЭД на всю его номинальную мощность, ее приходится занижать. Например, полная загрузка ЭД может наступить при использовании лишь 80% номинальной мощности, указанной в его паспортных данных.

Кроме того, высокочастотные гармоники тока в силовых цепях (причина появления вихревых токов в цепях) вызывают дополнительные потери мощности и перегрев конструкции ЭД. Для линейных цепей ЭД, потери на вихревые токи составляют в общих потерях приблизительно 5%, а в нелинейных цепях они возрастают в 15÷20 раз.

В докладе предлагается эффективная методика расчета токов в обмотках статора асинхронного ЭД. В результате решения электромагнитной задачи определены токи в электропроводящих телах ЭД. Токи в нулевом проводнике превышают фазные токи в обмотках статора ЭД. Поэтому, на корпусе ЭД, подключенного к нулевому проводнику, могут возникать напряжения, оказывающие при прикосновении раздражающее влияние на человека.

Кроме того, СЭП характеризуется существенной несинусоидальностью и несимметрией форм напряжения и тока в элементах своих устройств, во много раз превосходящих нормы на качество электрической энергии в промышленной сети. Поэтому методология оценки несинусоидальности форм напряжения и тока, критерии качества процессов в СЭП требуют ревизии структуры ЭП.

Пример принципиальной схемы системы регулирования скорости вала ЭП, построенной по принципу подчиненного регулирования приведен на рис. 1. В соответствии с принципом подчиненного регулирования, его внутренний контур тока охвачен контуром скорости.

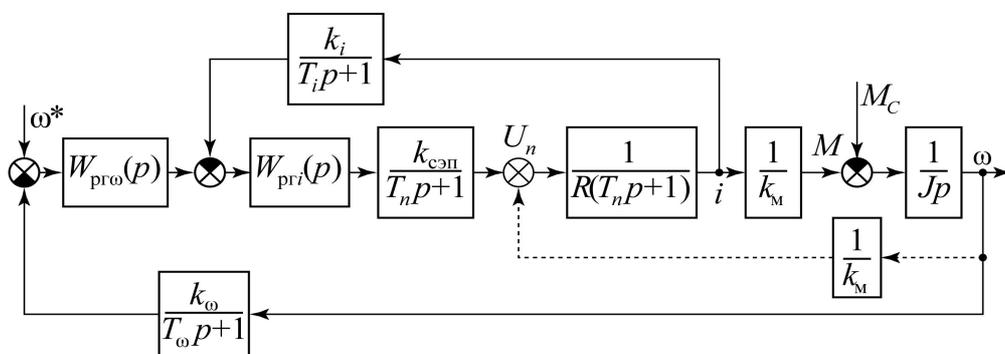


Рис. 1

Передаточная функция схемы контура тока имеет вид

$$W_{OI}(p) = \frac{k_n k_I T_M p}{(T_{\mu I} p + 1) \cdot (T_m T_s p^2 + T_M p + 1) \cdot R}, \quad (1)$$

здесь в расчетах можно принять  $k_I = 1$  – коэффициент передачи датчика тока;  $T_{\mu I} = T_n + T_I$  – малая постоянная времени контура тока;  $T_I = 0,01$  с – постоянная времени датчика тока.

Для расчета основных параметров следящего привода с асинхронным двигателем и с векторным управлением в соответствии с [2] известно:

$$\begin{cases} L_{12} = \frac{2}{3} \cdot \frac{X_{12}}{314}, & L_1 = \frac{X_1}{314} + L_{12}, & L_2 = \frac{X_2}{314} + L_{12}, \\ R = R_1 + R_2 \frac{L_{12}^2}{L_2^2}, & k_M = \frac{1}{R}, & T_\omega = k_M L_1 \frac{L_{12}^2}{L_2}. \end{cases} \quad (2)$$

При расчетах ЭП с обратной связью по току обычно пренебрегают обратной связью по ЭДС, показанной на рис. 1 пунктиром. Передаточная функция схемы контура тока равна

$$W_{0I}(p) = \frac{k_n k_I}{(T_{\mu I} p + 1) R (T_\omega p + 1)}. \quad (3)$$

Настроим контур тока на оптимум по модулю с помощью ПИ-регулятора с передаточной функцией

$$k_{PI} = \frac{T_\omega R}{2T_{\mu I} k_n k_I}, \quad (4)$$

где  $T_\omega = T_{PI}$ . Для такой настройки при всех  $T_\omega \gg T_{\mu I}$  контур тока будет работать без статической ошибки. Но в большинстве случаев из-за обратной связи по ЭДС статическая ошибка остается, поэтому приведенные формулы являются только ориентировочными.

После настройки контура тока его считают частью объекта управления с внешним контуром скорости. Передаточная функция такого объекта с оптимизированным контуром тока, с приведенными к одному масштабу входными сигналами и скомпенсированной обратной связью по ЭДС равна

$$W_0(p) = \frac{k_\omega}{J k_I k_d p (T_{\mu \omega} p + 1)}, \quad (5)$$

где  $T_{\mu \omega} = 2T_{\mu I} + T_\omega$ .

ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{PI\omega}(p) = k_{PI\omega} = \frac{J k_I k_d}{2T_{\mu \omega} k_\omega} \quad (6)$$

обеспечивает настройку контура скорости на оптимум по модулю (однократное интегрирование). При использовании ПИ-регулятора скорости с тем же коэффициентом передачи и постоянной интегрирования  $T_{PI\omega} = 4T_{\mu \omega}$  реализуется настройка на симметричный оптимум (двукратное интегрирование).

При расчете параметров регуляторов системы управления ЭП сделано достаточно много допущений, поэтому регуляторы требуют наладки на модели объекта. Моделирование позволяет оценить качество реакции системы на небольшие ступенчатые воздействия. Если результат расчета регуляторов не дал качественных процессов, следует уточнить параметры регуляторов или настроить регуляторы системы управления заново.

Наладка таких регуляторов производится последовательно для каждого замкнутого контура, начиная с внутреннего. Вначале в контур включают пропорциональный регулятор и, постепенно повышая его коэффициент усиления, наблюдают за характером переходного процесса, подавая на систему ступенчатые входные воздействия и не допуская ограничения регулятора. По мере увеличения коэффициента усиления замкнутого контура время переходного процесса в нем сокращается, но возрастает перерегулирование. Как только процесс станет колебательным, следует прекратить увеличение коэффициента усиления регулятора и даже слегка уменьшить его.

В следующем шаге в регулятор СУ включается интегратор. Постепенно уменьшая время интегрирования, вновь наблюдаем за характером переходного процесса при небольших ступенчатых входных воздействиях. По мере снижения постоянной времени интегрирования возрастает ожидаемое значение перерегулирования, и как только оно достигнет допустимой величины, необходимо прекратить уменьшение постоянной времени интегрирования.

Если быстроедействие исследуемого контура остается недостаточным, можно попытаться ввести в регулятор дифференциальную составляющую. Постепенно повышая время дифференцирования, продолжают наблюдение за характером переходного процесса. По мере роста постоянной времени дифференцирования возрастает и ожидаемое значение перерегулирования.

Затем включаются электронные средства управления, и входные сигналы регулируют по величине, проверяя реакцию системы с учетом присущих ей нелинейностей. На этом процесс настройки контура регулятора завершается и переходят к следующему контуру регулятора.

Таким образом, можно считать обоснованным применение для системы (рис. 1) регуляторов с «жесткой» настройкой параметров. При оценке параметров регуляторов с учетом технологически допустимого диапазона изменения параметров ЭП принципиальным является применение методов теории планирования эксперимента.

Рассматриваемый в настоящей статье подход к оценке качества работы ЭП, естественно, отличается от классических методов, однако вопросы оценки и назначения допусков на параметры конкретных систем уже сами по себе представляют значительный практический интерес. Исследования показали, что полученные результаты могут быть распространены и на электроприводы с синхронными двигателями и двигателями на постоянном токе.

### Список литературы

1. Хасанов З. М., Хасанов О. З. Самонастраивающаяся информационно-управляющая система с моделью для динамического управления электроприводами в высокотемпературных технологических процессах // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 12. С. 23–32.

2. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. - 654 с.

## **МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

### **Аннотация**

В статье рассматривается методика формирования траектории движения мобильного робота. Особенностью предлагаемого подхода является оптимизация и корректировка ключевых точек траектории в соответствии с конфигурацией рабочего пространства. Эффективность метода достигнута благодаря использованию аппарата нечеткой логики.

### **Введение**

Одной из наиболее важных задач планирования движения мобильных роботов является задача достижения поставленной цели при наличии препятствий различного типа. Решение подобной задачи вызывает большие сложности при попытках реализации системы планирования траекторий для мобильных роботов. Для решения могут быть использованы различные методы: от классических алгоритмов построения траектории до методик искусственного интеллекта. Вследствие того, что робот является технической системой реального времени, то при реализации предпочтение будет отдаваться методам, обладающим меньшей вычислительной сложностью при сохранении приемлемого качества управления. Так нечеткая логика позволяет описать сложное поведение посредством набора простых лингвистических правил, что делает ее идеальным инструментом для управления сложными системами.

### **Описание методики формирования траектории**

Большинство существующих систем управления интеллектуальными мобильными роботами строится на базе классической пятиуровневой модели управления [1]. В данной работе классическая архитектура системы управления дополнена новыми функциональными блоками (рис. 1).

Формирование траектории движения мобильного робота проводится в два этапа. На первом этапе (реализуется на стратегическом и тактическом уровнях) реализуется обработка сенсорной информации с датчиков дальнего действия по результатам которой синтезируется модель внешней среды; выполняется ввод или коррекция конечной целевой точки, задаваемой декартовыми координатами рабочего пространства мобильного робота; выбирается желаемая траектория движения (форма, вид), конкретизируются требования по скоростным характеристикам, зонам мониторинга и т.д. Вся полученная и введенная информация сводится в базу данных, которая позволяет более быстро обрабатывать запросы системы управления, проводить анализ текущего состояния системы и внешней среды, результатов моделирования, генерировать достоверные прогнозы и т.д.

На основе полученной модели внешней среды и заданных оператором параметров выполняется расчет подцелевой точки движения, выбор необходимой стратегии движения (прямолинейное движение к цели, обход препятствий). В зависимости от типа выбранной стратегии движения выполняется разбиение траектории на участки, описываемые допустимыми примитивами (прямые, полиномы различного порядка), формируется массив промежуточных точек (точек сшивки примитивов), уточняются алгоритмы сшивки траектории.

На втором этапе (адаптивный уровень управления) выполняется анализ рабочего пространства в непосредственной близости к мобильному роботу и в соответствии с полученными результатами либо рассчитываются необходимые значения линейной и угловых скоростей платформы робота, либо формируется запрос на перерасчет траектории, сгенерированной на первом этапе. Это происходит в случае обнаружения динамических препятствий или когда уточненная датчиками робота геометрия статических препятствий требует перерасчета ключевых точек траектории. Для коррекции траектории также используется нечеткий регулятор.

### Нечеткая система

На платформе мобильного робота по всему периметру расположены 8 датчиков, область охвата каждого из них составляет 45 градусов (рис. 2). Выбранная конфигурация датчиков позволяет своевременно обнаруживать препятствия и предотвращать столкновения.

Входными сигналами нечеткого регулятора, используемого для генерации траектории, являются:  $a_1-a_8$  – данные, считываемые от 8 датчиков;  $b$  – угловое отклонение платформы робота от целевой (промежуточной) точки.

Наименование нечетких переменных выбрано в соответствии с расположением соответствующего датчика: Сзади-Слева, Слева, Прямо-Слева, Прямо, Прямо-Справа, Справа, Сзади-Справа, Сзади.

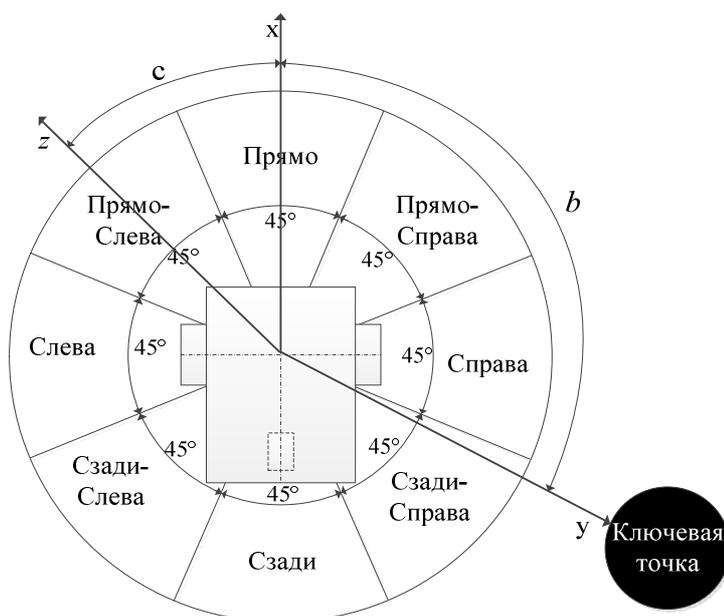


Рис. 2. Конфигурация расположения датчиков

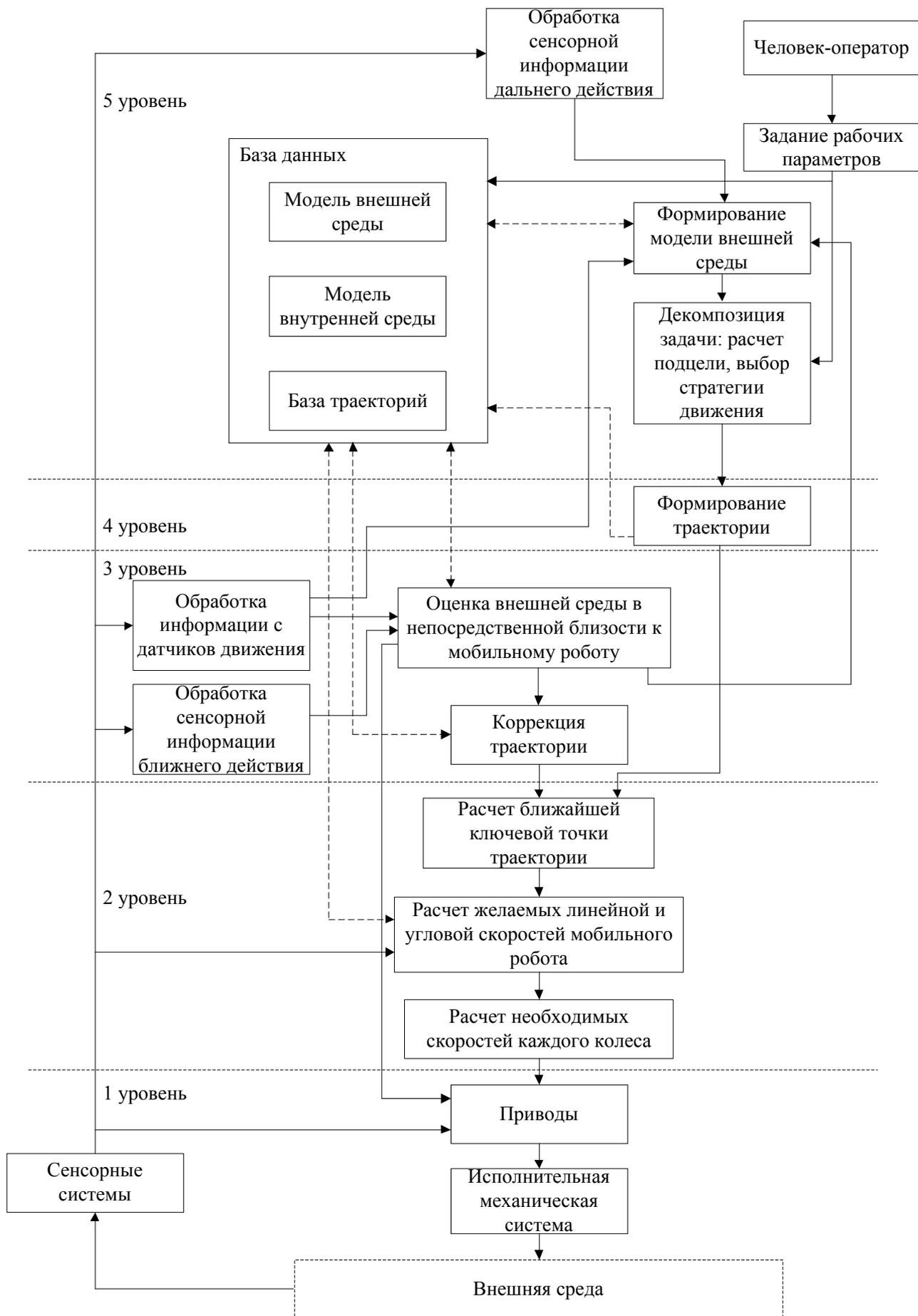


Рис. 3. Функциональная схема системы управления мобильным роботом

Таким образом, на вход нечеткого регулятора подается 9 сигналов. Выходными сигналами нечеткого регулятора являются:  $c$  – направление движения мобильного робота,  $d$  – линейная скорость мобильного робота;

На основании полученного (рассчитанного) направления движения мобильного робота определяется необходимое изменение ориентации робота. При расчете направления учитываются конфигурация рабочей зоны в непосредственной близости к мобильному роботу и текущее угловое отклонение от направления к цели. Значение выходной переменной  $c$  может не совпадать с направлением  $b$ , вследствие возможных препятствий на направлениях «Прямо», «Прямо-Справа», «Справа» и т.д. На основе рассчитанных значений направления движения и линейной скорости корректируются координаты новой ключевой точки.

В нечеткой системе определено 9 входных переменных. Каждая из переменных  $a_1$ - $a_8$  определена с помощью двух термов (ПРЕПЯТСТВИЕ, СВОБОДНО). Переменная  $b$  определена с помощью 9 термов (СЗАДИ\_Л, СЗАДИ\_СЛЕВА, СЛЕВА, ПРЯМО\_СЛЕВА, ПРЯМО, ПРЯМО\_СПРАВА, СПРАВА, СЗАДИ\_СПРАВА, СЗАДИ\_П). Следовательно, общее количество правил, необходимых для учета всех возможных комбинаций входных данных равно  $2^8 \times 9 = 2304$ .

В данной работе, для уменьшения общего количества правил было сделано 2 допущения: первое - наиболее эффективная траектория перемещения – прямая линия; и второе - в том случае, если эффективная траектория перекрыта препятствием, то рассчитывается наиболее короткая доступная траектория, которая позволит обойти данное препятствие с минимальным угловым отклонением от целевой точки.

С учетом принятых условий, общее количество правил удалось сократить до 81 – по девять вложенных правил для каждого из девяти значений углового отклонения робота от цели. Методика оптимизации пространства решений базируется на уменьшении количества рассматриваемых комбинаций переменных за счет удаления правил заведомо нерабочих в данной окружающей обстановке.

### **Заключение**

Разработана методика формирования траектории движения мобильного робота на основе нечеткого логического подхода. Методика состоит из двух этапов: на первом формируется кусочно-линейная траектория движения, на втором выполняется оптимизация рассчитанной траектории. Особенность предложенной методики заключается в эффективной коррекции ключевых точек на этапе оптимизации траектории, реализуемой используемым аппаратом нечеткой логики и простотой полученной базы правил нечеткой системы.

### **Список литературы**

1. Юревич Е.И. Основы робототехники. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 208 с.

## **СТРУКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫМ РОБОТИЗИРОВАННЫМ КОМПЛЕКСОМ**

### **Аннотация**

В данной работе решается задача автоматизации ремонтно-строительных работ: выполнение лицевой и черновой кладки кирпича, сварочные работы, оштукатуривание и покраска стен. Разрабатывается конструкция автономной роботизированной платформы, интеллектуальная система управления роботизированным комплексом, система технического зрения для распознавания объектов и корректировки позиционирования рабочего органа.

### **Введение**

Автоматизация и роботизация промышленности – одно из наиболее прогрессивных направлений в комплексной механизации производства.

В настоящее время строительство является одной из обширнейших и наиболее дорогостоящих сфер деятельности. Объем работ, выполненных по виду деятельности «Строительство» в 2011г. в РФ составил 5601,8 млрд рублей, в январе-сентябре 2012г. – 3648,7 млрд. рублей, или 101,9% к уровню соответствующего периода предыдущего года. Как показывает практика, фактические сроки сдачи объекта строительства почти никогда не совпадают с изначально запланированными. Особенно остро эта проблема проявляется в России. Присутствуют также проблемы, связанные с неудовлетворительным качеством выполняемых работ и существенным перерасходом стройматериалов. Перед строительным сектором стоит задача - в ближайшие 7-10 лет увеличить нынешние 17 кв. м на человека до 26. Следовательно, ежегодно необходимо вводить в строй 140-150 миллионов кв. м жилья [1].

### **Перспективы коммерциализации**

На сегодняшний день автоматизации каких-либо строительных технологий практически нет, поэтому тема исследований является актуальной. Применение разрабатываемого комплекса позволит не только приблизиться к заданным срокам сдачи объектов строительства, но и сократить сроки строительства за счет автоматизации строительных работ. Качество работ с эстетической точки зрения более предпочтительно для многих заказчиков при строительстве индивидуальных домов. Комплекс выполняет работу по жестко заданной программе в полном соответствии с проектной документацией объекта строительства и постоянно осуществляет контроль качества выполняемых работ.

На рынке строительной техники уже появился новый класс машин – строительные роботы. По прогнозам экспертов, уже в ближайшем будущем дистанционно управляемая и автоматическая техника займет место обычных строительной техники. Под «строительным роботом» в данном случае понима-

ется электрическая дистанционно управляемая машина на гусеничном ходу, которая оснащена широким спектром гидравлического демонتاжного оборудования. На практике один оператор с дистанционно управляемой машиной оказывается дешевле и производительнее бригады из 16 «гастарбайтеров», или двух машин типа «Bobcat». Но такие машины являются демонтакными комплексами, а не строительными роботами, которые будут выполнять работу по жестко заданной программе в автоматическом режиме.

К сожалению, в сфере строительной робототехники Россия вообще не представлена. А шведский производитель Brokk занимает лидирующее положение в мире и поставляет около 95 % всех дистанционно-управляемых роботов для различных отраслей производства и строительства [2].

Сфера нового строительства пока остается наиболее обширной и открытой для автоматизации. Из общего объема инвестиций в 2011г. (5061,8 млрд. рублей) 34,3% составили машины, оборудование, транспортные средства.

### **Конструкция роботизированного комплекса**

Совместно с УНИЦ «Гидропневмоавтоматика» и ООО «Центр автоматизации и роботизации» разработан прототип конструкции автономного роботизированного комплекса, обеспечивающего сохранение горизонтального уровня пола платформы при движении, эффективность гашения колебаний от неровностей дорожного покрытия и работы стороннего оборудования.

Благодаря управляемым пневматическим амортизаторам комплекс постоянно сохраняет горизонтальный уровень платформы во время движения, увеличивает рабочую зону промышленного робота по высоте, позволяет использовать системы видеонаблюдения в процессе движения без существенной потери качества изображения. Модульная конструкция платформы позволяет легко ее реконфигурировать под конкретную технологическую задачу и наращивать бортовое оборудование. Возможна работа в различных климатических условиях и потенциально взрывоопасной среде [3].

### **Система управления комплексом**

Особенностью функционирования РТС является фактор неопределенности, то есть неопределенность обстановки в рабочей зоне и различные условия эксплуатации. Поддержание функциональной эффективности управления роботизированным комплексом в условиях неопределенности предполагает наличие иерархической системы управления, обладающей развитыми интеллектуальными возможностями по анализу и распознаванию обстановки, формированию стратегии целесообразного поведения, планированию последовательности действий и синтезу исполнительных законов для их реализации с необходимыми показателями качества. Укрупненная структура многоуровневой интеллектуальной системы управления строительным роботизированным комплексом представлена на рис. 1.

На стратегическом уровне решается задача формализации цели управления системы, планирования поставленных задач по выполнению строительных операций, например, кирпичной кладки; планирование действий робота или по-

ведения РТС в соответствии с целью её функционирования и реальной обстановкой. Блок планирования и распределения действий генерирует множество достижимых последовательностей выполнения работы, из которых затем выбирает оптимальную последовательность.

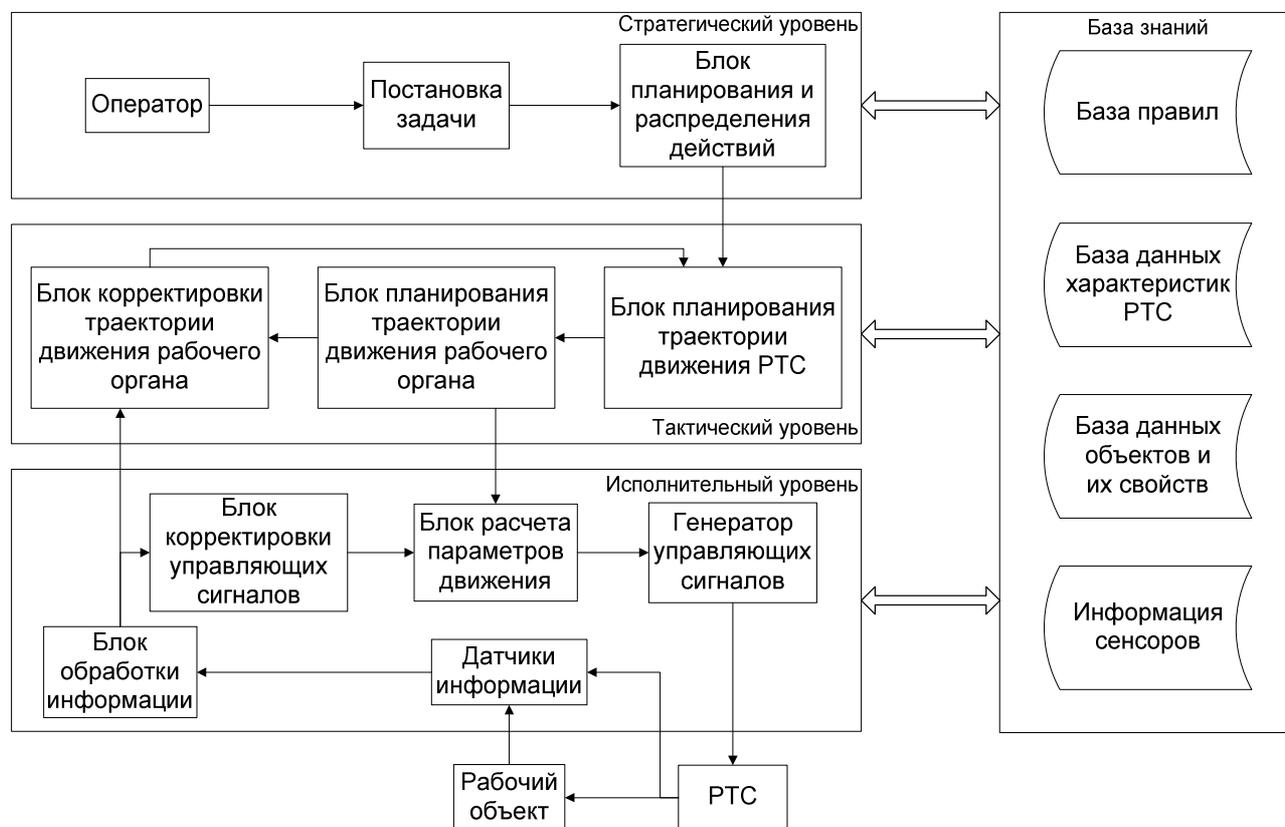


Рис. 1. структура интеллектуальной системы управления строительным роботизированным комплексом

На тактическом уровне решается задача планирования траекторий движения комплекса и рабочего органа в соответствии с планом работы, выработанным на стратегическом уровне. Блок планирования траектории движения РТК осуществляет планирование траекторий движения к рабочим местам с учётом обхода препятствий. Блок планирования траекторий движения рабочего органа прорабатывает последовательность действий манипулятора для выполнения поставленной задачи. Поскольку габаритные характеристики рабочих объектов могут отличаться, и каждый вновь установленный рабочий объект становится препятствием, необходимо постоянно корректировать траекторию движения рабочего органа. За это отвечает блок корректировки траектории движения рабочего органа, вырабатывающий управляющие воздействия с учетом информации о наличии появившихся препятствий. Для этого блок обработки информации постоянно передает сведения о местоположении рабочих объектов, их пригодности и необходимой ориентации перед установкой, координатах уже установленных рабочих объектов, на основании которых корректируется траектория движения рабочего органа манипулятора РТК.

На исполнительном уровне происходит расчет параметров движения РТК для достижения необходимой области выполнения комплекса строительных

операций, параметров движения рабочего органа в этой области в соответствии с данными, получаемыми от блока планирования траектории движения рабочего органа. Блок корректировки управляющих сигналов обеспечивает точное позиционирование и ориентацию рабочего объекта в месте монтажа на основании данных, полученных с блока обработки информации. Рассчитанные параметры движения обрабатываются и преобразуются в напряжения генератором управляющих сигналов, контроллером, и подаются на исполнительные механизмы РТК. Блок обработки информации отвечает за обработку всей информации, поступающей с датчиков информации, она передается для дальнейшего использования всеми уровнями системы автоматического управления.

Важными компонентами интеллектуальной САУ РТС являются базы знаний и данных, которые используются на всех уровнях управления.

Разработана линейная математическая модель электропневматического следящего привода управляемых амортизаторов платформы со следующими показателями качества регулирования: время регулирования 0.6с при установившемся значении 100мм, перерегулирование и установившаяся ошибка отсутствуют.

Математическая модель интеллектуальной САУ пневмоприводом управляемых амортизаторов роботизированного комплекса разработана с помощью программы *FuzzyPID* пакета *Matlab*, основанной на использовании математического аппарата нечеткой логики [4].

### Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/>;
2. Гид по строительной и спецтехнике [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stroyteh.ru/>;
3. Мунасыпов Р.А., Целищев О.В. Мобильный роботизированный комплекс для ремонтно-строительных работ. 15 Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, декабрь 2011 г.: сборник докладов. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - 276 с.
4. Мунасыпов Р.А., Целищев О.В. Интеллектуальная система управления пневмоподвеской платформы роботизированного комплекса для ремонтно-строительных работ. 5-я Российская мультikonференция по проблемам управления «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах». Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2012 – С.831-834.

## **КООРДИНАЦИЯ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ СЛОЖНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА КАК ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МЕРА**

### **Аннотация**

В данной статье приводится модель оценки результатов апробации в условиях электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» («ОЭМК»), позволяющая оценить степень координации производственного оборудования как экономическую меру.

### **Введение**

Инструментом согласования работы отдельных элементов управляемой системы с целью реализации текущих производственных графиков является технологическая координация, заключающаяся в согласовании (синхронизации) работы технологического оборудования и транспорта, движения материальных потоков, взаимодействия производственного персонала цеха при отклонении фактического хода производства от запланированного.

В работах [1, 2] рассмотрены математические модели и алгоритмы интеллектуализации технологической координации сложноструктурируемых дискретно-непрерывных производственных систем на основе мультиагентных технологий.

### **Координация производства на основе мультиагентных технологий**

Структура мультиагентной системы (МАС) поддержки принятия решений (ППР) технологической координации и управления включает блок принятия решений концептуальной схемы на основе агента-оптимизатора и агента-супервизора, блок анализа проблем, представленный агентом-реализатором, имитационную модель производства – агентов – исполнителей.

Агент-супервизор – интерфейсный агент, решающий задачу взаимодействия агентов МАС и связи с пользователем. Он выдает плановое производственное расписание, отчет по анализу «узких мест» текущего расписания и варианты его корректировки, формирует задания нижестоящим агентам МАС на обработку производственных заказов в соответствии с принятым расписанием.

Агент – оптимизатор – гибридный агент, в задачу которого входит построение оптимального производственного расписания на основе правил и ограничений производства.

Агент-реализатор – гибридный агент, который осуществляет проверку сформированного расписания на реализуемость.

Агент-исполнитель – партнерский агент, задачей которого является слежение за работой конкретного технологического агрегата, входящего в реализуемый технологический маршрут.

Координация агентов в системе осуществляется на основе непрямого взаимодействия, которое соответствует распределению функциональных задач МАС. Агент–супервизор формирует технологическое задание по обслуживанию заказов с учетом изменившейся производственной ситуации, которое в виде входного сообщения передается агенту-оптимизатору, идентифицирующему состояние производства и определяющему группы агентов-исполнителей. Степень готовности агентов-исполнителей принять задание анализируется агентом-реализатором, который формирует и посылает агенту-супервизору сообщение о возможности выполнения заданий каждым исполнителем.

Супервизор на основе информации о готовности агрегатов и их занятости в реализации плана корректирует производственную программу и направляет откорректированное расписание агенту-реализатору для проверки возможности его выполнения [2].

### **Модель оценки координации**

В качестве основы разработки оценочной модели степени координации производственного оборудования был принят подход, описанный в [3].

Каждому заказу на металлопродукцию  $Z\{M, m, TP\}$  определенной марки  $M$ , объема (массы в тоннах)  $m$  и типоразмера  $TP$  соответствует его стоимость  $L=F'(Z)$ , а также штрафные санкции  $S=F''(Z)$  при его невыполнении или ненадлежащем исполнении. В контактном графике (КГ) конкретному заказу соответствует определенный технологический маршрут  $TM\{TO_1, TO_2, \dots, TO_N\}$  с указанием времени начала  $t_n$  и окончания  $t_o$  выполнения каждой технологической операции  $TO\{t_n, t_o\}$ .

Планируемый и фактически выполненный заказы могут ввиду раскоординации производства отличаться последовательностью прохождения по агрегатам при выполнении ТМ, временем обработки на отдельных ТО, маркой и массой заказа. Затраты на управление (координацию) пропорциональны суммарным отклонениям фактического производственного расписания от директивного сменно-суточного задания (ССЗ), другими словами, наиболее эффективно такое управление, при котором директивное ССЗ выполнено с наименьшими отклонениями.

### **Потери от несогласованности работы**

Применение таких положений для определения количественной меры раскоординации (несогласованности работы) структурных подразделений при выполнении ССЗ позволяет рассчитать экономическую меру суточных заданий цеху и каждому технологическому участку (руб):

- суммарные потери каждого технологического участка при выполнении планируемого набора ТМ, приводящие к нарушениям КГ и внесенные по вине

этого технологического участка в согласованную работу цеха. Этот показатель включает:

- 1.) потери от нарушения технологии по измененным (незаказным) маркам стали:

$$L_M = \sum_i m_i (C_{n_i} - C_{\phi_i}) \quad (1)$$

где  $i$  – номер заказа в ССЗ,  $m_i$  – объем (масса в т.) заказа;  $C_{n_i}$  – себестоимость запланированной марки;  $C_{\phi_i}$  – себестоимость фактической марки;

- 2.) потери от уменьшения объема заказа:

$$L_m = \sum_i C_i (m_{n_i} - m_{\phi_i}) \quad (2)$$

где  $m_{n_i}$  – плановый объем выпуска марки стали;  $m_{\phi_i}$  – фактический объем заказа;  $C_i$  – себестоимость марки стали;

- 3.) потери, обусловленные дополнительными операциями, по всему оборудованию цеха:

$$L_{don} = \left[ \sum_i C_i \cdot \sum_l P_{li} \cdot \Delta T_{li} \right] + \left[ \sum_i C_i \cdot \sum_j P_{ji} \cdot \Delta T_{ji} \right] \quad (3)$$

где  $P_{ji}$  и  $P_{li}$  - показатели производительности  $j$ -го технологического агрегата и  $l$ -го крана при выполнении  $i$ -го заказа;

$\Delta T_{ji}$  и  $\Delta T_{li}$  - потери времени от дополнительных транспортно-технологических операций для  $i$ -го агрегата

- по технологическому оборудованию:

$$\Delta T_{ji} = T_{факт_{ji}} - T_{план_{ji}} \quad (4)$$

где  $T_{факт_{ji}}$  – фактическое время работы  $j$ -го технологического агрегата при выполнении  $i$ -го заказа с учетом дополнительной операции,  $T_{план_{ji}}$  – плановое время работы  $j$ -го технологического агрегата при выполнении  $i$ -го заказа.

- по транспортным средствам:

$$\Delta T_{li} = T_{факт_{li}} - T_{план_{li}} \quad (5)$$

где  $T_{факт_{li}}$  – фактическое время работы  $l$ -го крана при выполнении  $i$ -го заказа с учетом дополнительной операции,  $T_{план_{li}}$  – плановое время работы  $l$ -го крана.

- 4.) потери, обусловленные запаздыванием, по всем агрегатам цеха с учетом их производительности характеризуются долей невыполненных заказов из ССЗ, что обуславливает затраты в объеме:

$$L_z = \sum_i C_i \cdot \sum_j P_{ji} \cdot \Delta T'_{ji} \quad (6)$$

где  $\Delta T'_{ji}$  - потери времени каждого технологического участка по вине других технологических участков (запаздывание):

$$\Delta T'_{ji} = t_{н.факт_{ji}} - t_{н.план_{ji}}; \quad (7)$$

где –  $t_{н.факт\ j}$  фактическое время начала работы  $j$ -го технологического агрегата при выполнении  $i$ -го заказа,  $t_{н.план\ j}$  - плановое время начала работы  $j$ -го агрегата по данному заказу в соответствии с производственным расписанием.

5.) штрафы  $S=F''(Z)$  обусловлены:

- нарушением технологии производства в соответствии с (1), в этом случае заказчик может отказаться от покупки произведенной стали, т.к. она не соответствует качеству, оговоренному договором, что ведет к повторному выполнению данного заказа или полной его отмене, поиску покупателя на незаказную сталь;

- изменением объёма производственного заказа в соответствии с (2), в этом случае заказ может не быть выполнен вовремя, заказчик же в договоре оговаривает цену каждого дня просроченного заказа.

### **Заключение**

Таким образом, можно определить координацию как экономическую меру согласованной работы при выполнении технологическими участками КГ, сумму общих потерь при выполнении всех заказов на суточном интервале для всех технологических участков и кранов с учетом штрафов:

$$L = L_z + L_{дон} + L_m + L_M + S \quad (8)$$

Параметры критерия (8) имеют разные информационные запаздывания, что предъявляет особые требования к сбору и обработке экономической и организационно-технологической информации.

Анализ реальных и оптимизированных с использованием разработанных алгоритмов показывает, что ввиду сокращения простоев технологического оборудования и снижения условных потерь [1] производительность цеха за смену повысилась в среднем на 5-7%, что соответствует в объемном представлении 57-62 тоннам. Данный вывод сделан на основе предложенной модели оценки координации как экономической меры.

### **Список литературы**

1. Мультиагентная система поддержки принятия решений по технологической координации производств с многовариантными технологическими маршрутами / М.А. Цуканов, Л.М. Боева // Системы управления и информационные технологии. Воронеж, 2012. № 2(48). С. 65–68.

2. Мультиагентная система поддержки принятия решений по оперативному управлению и технологической координации сложноструктурированных производственных систем / М.А. Цуканов, Л.М. Боева // Управление большими системами: сборник трудов. М.: 2012. №39. С. 26-31.

3. Координация работы цехов комплекса сталь-прокат как экономическая мера / В.К. Буторин // Сталь. М.: 1993. №6. С. 74-77.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ АНАЛИЗА И КЛАССИФИКАЦИИ СЛОЖНЫХ МЕЗОСТРУКТУР МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### Аннотация

Рассматриваются задачи анализа и классификации сложных мезоструктур на шлифах металлов и сплавов. Описываются разработанные алгоритмы решения задач распознавания на основе интеллектуальных технологий. Приводятся результаты решения задач и сравнение их с экспериментальными данными.

### Введение

Одной из инновационных задач, стоящих перед современной наукой, является создание многофункциональных сплавов со специальными физико-механическими свойствами, уровень которых определяется мезо- и микроструктурой материала и высокой точностью изготовления. Однако подобные процессы создания функциональных материалов нуждаются в строгом контроле создаваемой структуры, а также проверке соответствия формируемых свойств заданным.

В настоящее время существует не так много разработанных подходов и методов, которые можно было бы применить для решения задач анализа и классификации сложных структур на шлифах металлов и сплавов. Некоторые подходы, например описанные в [1], предлагают использовать программные продукты обработки изображений общего назначения (такие, как *Photoshop* и *Corel Draw*) для проведения анализа заданного шлифа металла. Подобный подход весьма ограничен с точки зрения использования в автоматических или автоматизированных системах. Существуют другие подходы, например, приведенные в работах [2-4], при которых создаются специализированные программные решения для анализа шлифов металлов. Однако предлагаемые в этих работах методы позволяют проводить только анализ численных характеристик структур металлов и сплавов.

Подобный количественный анализ является лишь необходимой частью в системах управления качеством создания функциональных материалов. Но также требуется качественный анализ – то есть решение задачи классификации сложноструктурированного шлифа металла или сплава, что требует разработки более точных и интеллектуальных методов распознавания.

Целью работы является создание интеллектуальной системы анализа и классификации сложных зёренных структур на шлифах металлов и сплавов, позволяющей:

- 1) Классифицировать наблюдаемые сложные зеренные структуры.

- 2) Идентифицировать количественные параметры зёренных структур.
- 3) Определять предысторию материала с известной мезоструктурой.
- 4) Осуществлять проверку на соответствие зёренных структур заданным параметрам.

Процесс анализа мезоструктур логично разбивается на два этапа:

- Качественный анализ, при котором проводится классификация структуры, а также определение возможной предыстории изучаемого материала.

- Идентификация параметров изучаемой зёренной структуры.

### Этап качественного анализа

При решении задачи классификации мезоструктуры, предполагается, что она задана в форме фотографии и требуется определить класс, к которому принадлежит данная структура, а также определить иные классы структур, наблюдаемые на фотографии (возможно наличие нескольких более простых структур на одной и той же фотографии).

Для решения этой задачи используются подходы искусственного интеллекта (нейро-сети и базы знаний) для поиска характерных закономерностей и проведения классификации на их основе. Шаги решения этой задачи показаны на рис. 1.



*Рис. 1. Алгоритм решения задачи классификации заданной мезоструктуры*

Первым шагом при проведении качественного анализа является предобработка фотографии, поступившей на вход системы. Это обусловлено тем, что фотографии на вход подаются с различного рода шумами и искажениями. Наиболее распространены среди них это цифровой шум и затемнения некоторых областей фотографии.

Целью этого шага является приведение фотографии к виду, пригодному для его автоматизированной обработки.

Для этого используются описанные в [5] методы приведения фотографии в цветовое пространство градаций серого, выравнивание гистограммы распределения цветов, а также применение подходов уменьшения шумов, основанных на локальном среднем значении.

На втором шаге качественного анализа происходит поиск закономерностей, характеризующих рассматриваемую мезоструктуру. Такой поиск основан на идее сопоставления наблюдаемых на изучаемом шлифе

структур с известными системе структурами. При этом могут использоваться классические методы распознавания образов, описанные в [6]. Однако, как показали исследования авторов [7], использование более сложного гибридного подхода, при котором используются как классические методы распознавания образов, так детерминированные подходы сравнения изображений, такие как SAD (сумма абсолютных разностей) приводят к более точным результатам.

На заключительном третьем шаге происходит лишь отображение результата пользователю системы. При этом визуально выделяются те области исследуемого шлифа, которые принадлежат одному классу.

На рис. 2 приведён результат работы разработанного гибридного алгоритма классификации мезоструктур при анализе сорбита закалки. Светло-серым цветом изображены области, которые стали ключевыми при классификации исследуемой фотографии к сорбитовым структурам. Разработанный алгоритм позволил определить большее количество пластинчатых структур с различной длиной пластин, что даёт преимущество использования перед классическими алгоритмами распознавания.



*Рис. 2. Результат распознавания сорбитных структур при анализе сорбита закалки*

### **Этап количественного анализа**

На этом этапе происходит идентификация характеристик зёрненной структуры на заданном шлифе металла или сплава. Под идентификацией здесь понимается определение численного значения различных параметров зёрненной структуры автоматизированным способом.

Разработанный алгоритм идентификации параметров зёрненной структуры разбит на несколько шагов, которые выполняются последовательно:

- Предобработка фотографии.
- Определение границ зёрен.
- Аппроксимация границ зёрен замкнутыми ломаными линиями.
- Подсчёт численных характеристик найденных зёрен.

Результатом шага определения границ зёрен является изображение, на котором границы зёрен представлены в более очевидной и лёгкой форме для автоматического выделения зёрен. Для этого используется алгоритм определения границ, основанный на применении матрицы конволюций с ядром преобразования в виде лапласиана [6]. Такое преобразование сводится к замене значения пикселя на скалярное произведение матрицы, построенной из

окружающих его пикселей на матрицу ядра преобразования.

Следующим шагом для подсчёта характеристик мезоструктуры является анализ границ и выделение зёрен. На данном этапе работы используется переборный алгоритм. После завершения работы этого шага алгоритма формируется массив данных, который описывает все найденные зёрна. Зёрна представляются как многоугольники, у которых известны координаты всех вершин в порядке обхода против часовой стрелки.

Следующим шагом алгоритма является подсчёт численных значений характеристик зёрен. Набор таких характеристик зависит от типа анализируемой структуры. В данный момент реализовано определение следующих характеристик: ориентация зерна, размер зерна (средний, максимальный, минимальный), анизотропия зерна, плотность распределения зёрен.

### **Выводы**

Проведён анализ алгоритмов распознавания, наиболее адекватно работающих в рамках решаемой задачи. Разработан гибридный алгоритм классификации зёренных структур, наблюдаемых на шлифах металлов. Показана его эффективность при распознавании сложных мезоструктур различных сплавов.

Разработан алгоритм количественного анализа структур на шлифах металлов и сплавов. Разработанные алгоритмы реализованы в виде автоматизированной системы анализа и классификации.

В дальнейшем предполагается развивать методы кластерного анализа мезоструктур, а также работать над реализацией методов, способных к анализу структур «без учителя», что позволит избавиться от необходимости ручной подготовки базы знаний для этапа качественного анализа мезоструктур, используемой на данном этапе работы автоматизированной системы.

### **Список литературы**

1. Костылева Л.В., Санталова Е.А., Ильинский В.А. Определение объемной доли дендритных ветвей с использованием компьютерных программ // Заводская лаборатория. – 2003. – № 11. – С. 33-36.
2. Мартюшев Н.В. Программные средства для автоматического металлографического анализа // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 1-6.
3. Электронный ресурс [http://siams.com/solutions/sol\\_grain\\_anisotropy.htm](http://siams.com/solutions/sol_grain_anisotropy.htm).
4. Электронный ресурс <http://www.optec.zeiss.ru/material/?n=23446703>.
5. Shih Frank. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. – IEEE Press, 2010. – 537 p.
6. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 412 с.
7. Шарыбин С.И., Ключев А.В., Столбов В.Ю. Сравнение методов распознавания образов в задачах поиска характерных зерновых микроструктур на фотографиях шлифов металлов и сплавов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2012. – №9. – С. 49-53.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОСТРОЕНИЯ НЕКОНФЛИКТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ КОЛЛЕКТИВА МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

### Аннотация

В данной работе рассмотрены возможные схемы управления и реализация распределенного алгоритма планирования неконфликтных траекторий с использованием метода «нейронных карт»<sup>1</sup> для группы мобильных роботов, осуществляющих перемещение в общем рабочем пространстве.

### Введение

В условиях интеграции и автоматизации технических процессов возникает необходимость построения систем для управления группами сложных динамических объектов, взаимодействующих между собой в процессе достижения общей цели. В течение последних лет данная задача являлась предметом многих исследований. Предлагаемые подходы к ее решению во многом основаны на идеях применения распределенных алгоритмов управления.

Методы «распределенного вычисления» наиболее эффективны при управлении сложными динамическими системами, состоящими из автономных объектов, выполняющих совместную работу, требующую организации сложного поведения в непредсказуемой среде. Они также значительно повышают эффективность управления такими системами на стратегическом, тактическом и исполнительном уровнях. Актуальность исследований в данной области во многом вызвана несовершенством моделей распределенных управляющих систем, а также необходимостью увеличения их производительности и точности.

Построение таких систем возможно при помощи аппаратно, программно или аппаратно-программно реализуемых алгоритмов распределенных вычислений и искусственных нейронных сетей (НС). Одним из актуальных принципов нейросетевого управления этими системами является управление с использованием «нейронных карт».

Впервые использование нейронных карт для решения такого рода задач было предложено в работе *Michail G. Lagoudakis «Mobile robot local navigation with a Polar Neural Map»* (1998), где предлагалась система позиционирования одного для мобильного робота (МР)<sup>1</sup>.

Целью данной работы является разработка схем и алгоритмов управления с использованием интеллектуального метода планирования траекторий («метод нейронных карт») для группы МР, осуществляющих перемещение в общем рабочем пространстве.

## Реализация распределенной системы управления

Одна из возможных реализаций такой системы представлена на рисунке ниже:

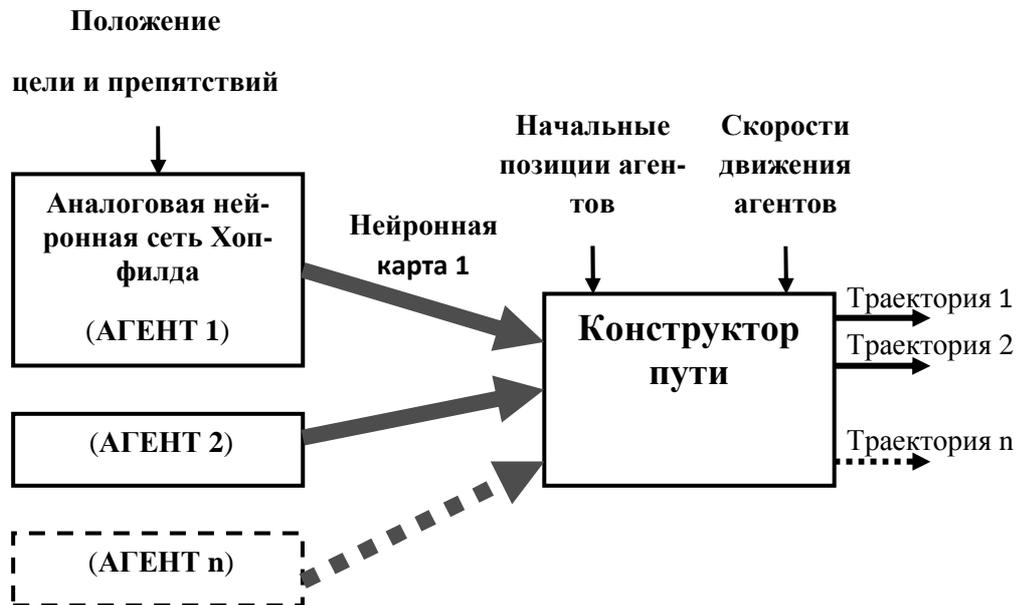


Рис. 1. Структурная схема системы планирования траектории по принципу «предрасчета»

Схема управления реализуется по принципу «предрасчета» - с общим блоком конструктора пути, осуществляющим многопоточное построение траекторий, и распределенной нейронной сетью. Возможен вариант системы и с распределенном блоком конструктора пути, когда каждый робот, помимо формирования собственной нейронной карты, также рассчитывает и собственную траекторию. При этом расчет и корректировка траектории производится по ходу движения агента, и на каждом новом шаге все (или находящиеся в непосредственной близости друг от друга) участники коллектива обмениваются информацией о текущей и расчетной позициях своей траектории по каналам связи. Данный вариант распределенной схемы управления особенно актуален при неравенстве и неравномерности скоростей участников коллектива.

Принцип работы системы по принципу «предрасчета» состоит в том, что каждый из роботов, движущихся в общем рабочем пространстве, снабжается собственной нейронной сетью Хопфилда, формирующей по заданной цели и препятствиям (их расположение известно) нейронную карту для данного агента. Сформированные нейронные карты поступают на общий блок конструктора пути, который рассчитывает от заданных начальных позиций агентов рассчитывает траектории, учитывая скорости движения агентов (если они не одинаковы).

Расчет траекторий роботов система выполняет в следующем порядке:

– Ввод начальных значений НС. Вводятся необходимые переменные для формирования нейронной карты: позиция цели, расположение препятствий,

также для более гибкого управления коллективом вводится вектор приоритетности  $P = [P_1, P_2, \dots, P_n]$ , где элементы вектора  $P$  – значения приоритета 1-го, 2-го и  $n$ -го мобильного робота соответственно.

- Формирование нейронных карт (получение матрицы энергии сети) для каждого из агентов.

- Ввод необходимых данных для конструктора пути: текущие позиции агентов, нейронные карты и, если необходимо, рассчитывается время прохождения одного шага траектории (по известной скорости).

- Пошаговый расчет и корректировка траектории для каждого мобильного робота с учетом конфликтных ситуаций и приоритетов. Ввиду ортогональной дискретизации рабочего пространства возможно возникновение следующих конфликтных ситуаций (рис. 2):

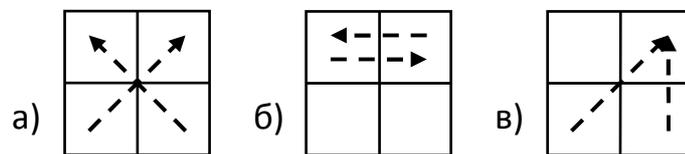


Рис. 2. Виды конфликтных ситуаций: а) перекрестное пересечение траекторий; б) встречное пересечение траекторий; в) совпадение расчетных позиций

При возникновении одной из таких ситуаций между двумя роботами, корректироваться траектория будет только для агента с более низким значением приоритета ( $P$ ), если же приоритеты роботов одинаковы, то оба агента будут корректировать траекторию относительно конфликтной позиции.

### Результаты работы системы

В процессе моделирования скорости движения агентов принимаются равными между собой. Результаты моделирования представлены ниже на рис. 3. Синими окружностями обозначены конфликтные позиции траекторий,  $StartN$  – начальная позиция робота  $N$ ,  $TargetN$  – целевая.

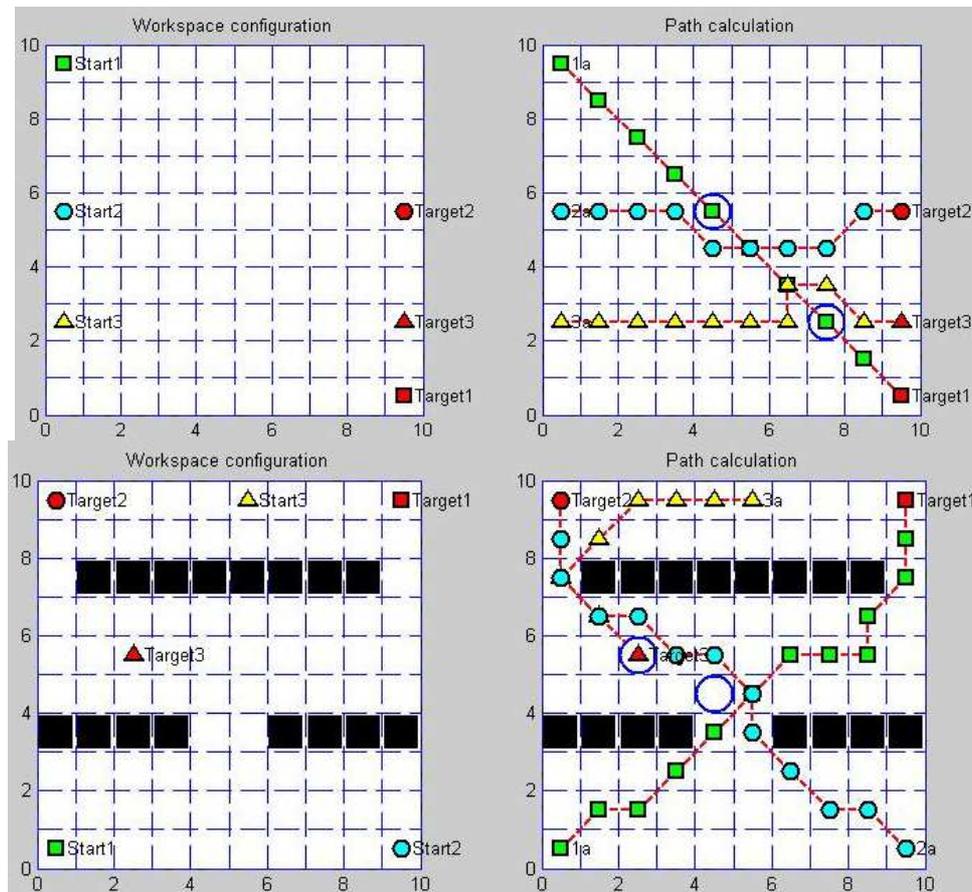


Рис. 3. Результаты моделирования системы управления тремя МР в различных конфигурациях рабочего пространства

### Заключение

Корректность работы данного алгоритма планирования была подтверждена экспериментально в различных конфигурациях рабочего пространства. При распараллеливании потоков вычисления система имеет достаточную высокую производительность, тем не менее, при реализации данной схемы управления (с общим блоком конструктора пути) накладывается дополнительное ограничение: скорости движения участников коллектива могут отличаться, но должны быть постоянны.

В дальнейшем планируется корректировка алгоритма планирования для работы системы по децентрализованной схеме управления, а также разработка аппаратной поддержки для распределенной децентрализованной системы с учетом аппаратной специфики бортовых комплексов.

Автор выражает благодарность Программе №1 фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН «Научные основы робототехники и мехатроники» за финансовую поддержку проводимых исследований.

### Список литературы

1. Mobile Robot Local Navigation with a Polar Neural Map / Michail G. Lagoudakis. - The Center for Advanced Computer Studies University of Southwestern Louisiana, 1999. P. 19 – 47.

## СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СКВАЖИН И МЕСТОРОЖДЕНИЙ

### Аннотация

Интеллектуальные скважины с дистанционным контролем и мониторингом стали мощным средством управления разработкой пласта. Сегодня на интеллектуальные скважины и месторождения, оснащенные контрольно-измерительной аппаратурой, возлагаются значительные надежды на восполнение извлекаемых запасов и ускорение добычи.

### Общее описание интеллектуальных скважин и месторождений

Отсутствие общепринятой формулировки понятий «Интеллектуальные энергетические системы», «Интеллектуальная скважина», «Интеллектуальное месторождение» на фоне повышенного интереса к данной тематике приводит к свободной трактовке рассматриваемых терминов. «Интеллектуальными» порой называют энергетические системы, просто оснащенные автоматикой, сигнализацией, диспетчерской системой, компьютерной сетью и так далее.

Еще в 1951 году американский ученый Мак-Кей ввел понятие самоорганизующихся или самоуправляемых машин (тогда не было понятия интеллектуальные системы), которые классифицируются в соответствии с тем, как в них осуществляются следующие общие функции:

- прием, классификация, запоминание и передача информации;
- реакция на изменения в окружающей среде, включая выдачу информации о состоянии самой машины;
- дедуктивные рассуждения на основе множества допущений или постулатов и обучения. В данном случае в обучение входит наблюдение и управление собственным целенаправленным поведением.

Все перечисленные функции характерны для современных интеллектуальных систем, в том числе и в нефтегазовой отрасли.

В состав ИТ-технологий методического обеспечения входят планирование измерений, экспериментов, испытаний и т.п.; обработка экспериментальных данных (например, статистическая); параметрическая и структурная идентификация, методы эффективного отображения информации, процедуры принятия решений, методы и технологии, основанные на идеях искусственного интеллекта и т.п.

В состав ИТ-технологий аппаратно-программного обеспечения входят датчики, исполнительные механизмы, ПЛК, каналы связи, средства отображения информации, системное и прикладное ПО и т.п.

Часто определение интеллектуальных систем рассматривается через набор функциональных свойств, таких как мониторинг и диспетчеризация.

Более содержательное определение заключается в рассмотрении интеллекта как сочетания способности предсказания среды со способностью выбора соответствующей реакции из множества возможных альтернатив с учетом результата предсказания и поставленной цели, т.е. определять интеллект в терминах поведения стремящейся к цели системы и измерять степень ее интеллекта по адекватности принимаемых ею решений. При отсутствии цели принятие решений беспредметно и термин "интеллект" не имеет смысла. Именно такой подход позволяет проектировать интеллектуальные системы.

Общность подходов к построению систем в энергетике и нефтегазовой отрасли с точки зрения их автоматизации и применяемых *IT* технологий, включающих планирование и обработку результатов измерений, построение математических моделей, составление энергетических балансов и т.п., позволяет интегрировать более эффективные решения, как в энергетике, так и нефтегазовой отрасли. Примеры таких интегрированных систем уже существуют: например, системы коммерческого и технического учета топливно-энергетических ресурсов (электроэнергия, тепло, газ, мазут и т.п.) [2].

#### **Актуальность создания и внедрения**

Использование концепции «интеллектуальных месторождений» помогает добиться следующего:

Во-первых, это оптимизация добычи. Такие системы позволяют получать самую детальную информацию о работе скважины, в том числе условиях работы ЭЦН и состоянии коллектора. На основе детального анализа получаемой информации можно создать на каждой скважине такие условия нефтедобычи, которые оптимально подходят для ее полноценной эксплуатации. Таким образом, повышается нефтеотдача пласта, а также темпы добычи.

Во-вторых, это сокращение затрат. Во многом это связано с автоматизацией производства при внедрении системы «интеллектуальных месторождений». У дежурного оператора не будет необходимости посещать кустовые площадки, он сможет получать все необходимые данные в режиме реального времени прямо на компьютер. Таким образом, он меньше подвергается риску и имеет больше времени для качественного выполнения других важных производственных задач.

Еще одно важное достоинство этого подхода - создание общей совместной работы, поскольку люди, работающие в любом офисе компании, имеют доступ к той же информации в реальном времени, что и персонал на месторождении. Эту улучшает работу всей команды и расширяет наши возможности по оптимизации производственных процессов.

Следующим важным моментом является необходимость срочно наладить эффективную систему научного сопровождения производственных технологий, особенно с использованием методов искусственного интеллекта. [2]

## Интеллектуальные скважины

Большая часть нефти и газа на территории России и СНГ добывается кустовым способом. Под «кустом скважин» понимают группу скважин (обычно 5 – 20 штук), расположенных на расстоянии от десятков до сотен метров одна от другой, объединенных в один «кустовой» коллектор, от которого отходит одна труба (шлейф) для соединения в промышленную сеть. Расстояния между кустами обычно от одного до нескольких километров (размеры всей сети обычно 10 – 20 км).

Классический подход при автоматизации кустов скважин – использовать системы телемеханики на основе кустовых контроллеров типа *RTU* (напр. *RC500* от *Honeywell*, *SCADAPack* от *Schneider Electric* и др.) и радио-модем. Схема достаточно проста: на кусте скважин устанавливается шкаф оборудования с контроллером *RTU*, который собирает данные (датчики давления, температуры устьев скважин, состояние ЭЦН/ШГН, ГЗУ – обычно *Modbus* и др.) и в некоторых случаях выполняет запуск/останов технологического оборудования. Далее через радио-модем осуществляется связь контроллера *RTU* с диспетчерским пунктом (рис. 1).

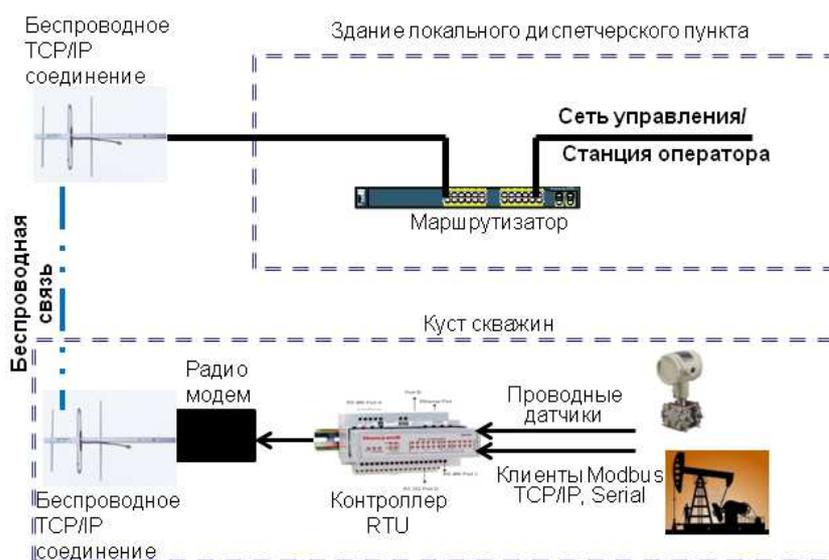


Рис. 1. Традиционный подход к автоматизации кустов скважин

Использование кустового контроллера вполне оправдано для объектов, где требуется возможность локального управления в замкнутом контуре (например, регулирование расхода). Но в большинстве случаев (особенно там, где автоматизация кустов отсутствует полностью) для контроля состояния работы куста скважин требуется следующая информация/функционал:

- параметры устьев скважин (давление, температура);
- данные со станций управления ЭЦН/ШГН и ГЗУ в формате *Modbus*;
- осуществление запуска/останова технологического оборудования.

Вместо традиционных проводных датчиков можно использовать их беспроводные аналоги. Это дает возможность избежать дорогостоящей и длительной «обвязки» всего куста эстакадами для прокладки кабелей от контроллера

*RTU* до проводных датчиков. Экономия по стоимости выше, если скважины находятся далеко друг от друга. Но существенной проблемой могут оказаться различные помехи, которые снижают один из важнейших параметров – надежность системы и достоверность передаваемых данных [1].

Естественно, помимо подходящего оборудования необходим комплекс мероприятий, позволяющих достичь:

- увеличения и / или оптимизации добычи;
- увеличения абсолютной нефтеотдачи;
- снижения и / или оптимизации капитальных затрат;
- снижения и / или оптимизации производственных затрат.

При такой формулировке вопроса, проблему можно разделить на две части:

- обеспечение надежности работы погружного оборудования, отсутствие отказов которого и принесет стабильную добычу и минимальные затраты;
- выбор оптимального режима эксплуатации - без геологии и истории разработки здесь не обойтись, какую бы насосную установку не использовали.

На уровне скважины есть два решения сделать ее «умной»:

1) Регулировка станцией управления. Плюс в обработке всей поступающей информации, мгновенной реакции на изменение параметров. Минус в ограниченности функциональности. Вывод скважины автоматически на оптимальный режим не осуществляется. Только работа на стабильных параметрах заданных оператором.

В этом случае все зависит от возможности станций. Например, можно автоматически поддерживать постоянный дебит или давление на приеме. Есть контроль турбинного вращения после останова. ЭЦН не запустится до окончания турбинного вращения. Также можно записывать рабочие параметры на карту памяти с заданной дискретностью, подключать сигналы внешних устройств (например, устьевого манометра). Существующие системы (*Centrilift*, *Toshiba*, Электон и др.) оснащены достаточным комплексом защит и имеют большие функциональные возможности, вплоть до графического интерфейса.

2) Удаленное управление. Плюс этого подхода в том, что потенциально нет предела совершенства по анализу работы. Минусом является то, что время опроса/передачи данных не моментальное. Объем передаваемых данных пока ограничен.

Здесь оснащение ЭЦН датчиком обязательно. Модуль телеметрии находится на станции, и связан по радиоканалу, *GSM*, спутнику с базой. Возможен удаленный опрос параметров и управление станцией. Управляющую программу можно создать любую, в том числе с искусственным интеллектом (то есть, своеобразного программного робота, моделирующего некий вид человеческой деятельности, которая считается интеллектуальной, например, автоматически считывать и анализировать параметры, регулировать частоту, при нестабильной токовой диаграмме выдавать сигнал на промывку скважины и т.д.) [3].

### **Интеллектуальное месторождение**

Концепция всей схемы интеллектуального месторождения – удаленное управление объектами нефтегазодобычи, контроль энергопотребления, повы-

шение энергоэффективности, рост результативности эксплуатации оборудования, рациональное управление персоналом, прозрачная информация и автоматизация производства. Действительно, решения для интеллектуального месторождения позволяют повысить добычу и снизить риски как для самой компании, так и для ее сотрудников. Технология интеллектуального месторождения дает возможность:

- Оптимизировать производительность оборудования и продуктивность скважин за счет анализа дебитов, отсечек, давлений, температур и других данных.
- Предсказывать на основе прошлых данных сроки истощения скважин. Одновременно данные старых скважин с богатой историей добычи можно использовать для прогнозирования поведения новых скважин.
- Централизованно управлять большим количеством скважин с помощью систем дистанционного мониторинга.

По мнению компании Делойт и Туш, технологию цифрового месторождения в структуре информационных потоков предприятия можно изобразить следующим образом:



Рис. 2. Технология ЦМ в структуре информационных потоков предприятия

Рассмотрим два основных уровня – аппаратный и уровень месторождений. На аппаратном уровне происходит сбор и доставка информации о состоянии добывающих скважин и оборудования до АРМ оператора, где осуществляется оперативный контроль и управление работой месторождения. Далее информация может быть обработана и отправлена на следующий уровень (месторождения) для осуществления задач по обслуживанию оборудования, режимов работы скважин, контролю операций и др.

Как видно из рис. 2, аппаратный уровень инфраструктуры АСУТП является базовым. Действительно, если нет актуальных, в режиме реального времени данных о состоянии оборудования, все последующие процессы попросту не будут иметь смысла: нельзя планировать, скажем, операции по сервисному обслуживанию оборудования если точно не известно, в каком оно находится состоянии в данный момент. Поэтому контроль состояния объектов нефтегазодо-

бычи (добывающих скважин и оборудования) является необходимым условием существования интеллектуального месторождения.

Несмотря на то, что общий уровень автоматизации объектов нефтегазодобычи достаточно высок, тем не менее существует множество месторождений, с практически полным отсутствием информации о состоянии добывающих скважин (давление, температура) и оборудования (ГЗУ, ЭЦН/ШГН). [1]

### **Выводы**

Несомненно, использование информационных технологий, включая методы искусственного интеллекта, позволит более полно и эффективно автоматизировать процессы генерации и транспортировки, а главное, сможет обучить промышленное оборудование принимать и обрабатывать противоречивые и порой неполные и нечеткие данные, полученные с различных скважин, а затем синтезировать их в единое информационное поле, обеспечивающее более эффективную разработку нефтяного или газового месторождения.

В перспективах развития *IT*-инфраструктуры нефтегазовой отрасли в первую очередь лежит автоматизация на основе интеллектуальных систем полного спектра всех работ, связанных с разработкой, добычей, транспортировкой и переработкой нефти и природного газа. Поскольку всё больше приобретает задача снижения себестоимости добычи, переработки, а также транспортировки нефти и газа. Эту задачу опять же помогает решить автоматизация основных ключевых процессов в таких областях как проектирование и технологический контроль разведочного бурения, расчет параметров бурения, управление геолого-геофизическими данными и т.д. [2]

### **Список литературы**

1. Решения Honeywell для создания интеллектуальных/цифровых месторождений [Электронный ресурс]. URL: <http://controlengrussia.com/artukul/article/reshenija-honeywell-dlja-sozdaniija-intellektualnykhcifrovyykh/> (дата обращения 10.03.2013)

2. А.А. Егоров. Роль интеллектуальных систем в нефтегазовой отрасли: предпосылки и перспективы [Электронный ресурс]. URL: <http://www.avite.ru/ngk/stati/rol-intellektualnyih-sistem-v-neftegazovoy-otrasli-predposylki-i-perspektivy.html> (дата обращения 9.03.2013)

3. Захаров А.А. Интеллектуальные месторождения [Электронный ресурс]. URL: [http://www.imkn.ru/KIB/zaharov/SharedDocuments/Конкурс Инфотех/ИИТ\\_Месторождение\\_1\\_5.rtf](http://www.imkn.ru/KIB/zaharov/SharedDocuments/Конкурс Инфотех/ИИТ_Месторождение_1_5.rtf) (дата обращения 11.03.2013)

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОПРОВОДОВ**

### **Аннотация**

В статье рассматривается инновационный метод обнаружения утечек нефти из трубопроводов – метод обратной ударной волны с применением нейротехнологий. Метод основан на непрерывной систематической регистрации давления нефти на концах фиксированного участка трубопровода в совокупности с конструированием соответствующей конфигурации «нейросети». Отличие предлагаемого метода в том, что он годится как для стационарных, так и для нестационарных режимов работы нефтепровода, и может использоваться как основной или дополнительный к уже существующим способам и системам определения утечки.

### **Введение**

В настоящее время актуальность проблемы оперативного и достоверного обнаружения утечек нефти из магистральных нефтепроводов (МН) обусловлена возросшими требованиями к экологической безопасности перекачки нефтепродуктов и требованиями к охране окружающей среды. Существует большое многообразие методов определения места не герметичности контролируемого участка трубопроводной системы, основанных на различных физических явлениях и принципах. Метод сравнения расходов, ультразвуковой метод, акустический. Самым распространенным является метод отрицательной ударной волны. Но их анализ показывает, что нет единого метода, который удовлетворяет всем критериям, предъявляемым к современным методам обнаружения утечек. Одни методы позволяют распознать только крупные утечки, и не чувствительны к малым, другие методы пригодны лишь в случаях плавного истечения жидкости, третьи надежны лишь в случае стационарного режима работы магистрального нефтепровода и дают ложные сигналы об утечке, если в трубопроводе возникают волны. Недостатком большинства используемых систем обнаружения утечек (СОУ) является то, что алгоритм основан лишь на одном из многих существующих методов детектирования. При одновременном воздействии нескольких негативных факторов, таких как повышенный шумовой фон, наличие переходного процесса в трубе, движение очистительного скребка, возможна ситуация, когда повреждение участка МН не будет обнаружено, или будет обнаружено со значительной временной задержкой [2].

Для устранения вышесказанных недостатков предлагается использовать систему обнаружения утечек, основанную на методе обратной ударной волны с применением нейротехнологий.

## Перспективы использования нейротехнологий

Используя термины нейротехнологии задачу СОУ можно разбить на следующие этапы:

- обучение и запоминание поведенческих образцов и стандартных эталонов, задаваемых внешними условиями;
- распознавание внешней ситуации, отнесение ее к одной из запомненных ситуаций, выбор соответствующего поведенческого образца;
- реализация выбранного образца поведения, поддержание эталонных значений переменных, возвращение к ним после возмущений, исправление ошибок и нейтрализация помех, создаваемых внешней средой;

Типичные отклонения можно идентифицировать по таким признакам как деформация труб, изменение режимов работы оборудования насосных станций, распределение давления по длине трубопровода, баланс расхода по локальным участкам трассы.

Основным методом нейронной технологии является конструирование соответствующей конфигурации «нейросети» - набора универсальных нелинейных элементов, нейронов, предназначенной для получения нелинейной функции нескольких переменных  $X_i$  с возможностью настройки его параметров  $C_j$ :

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m, c_1, c_2, c_3 \dots c_n), \quad (1)$$

Как правило, нейрон имеет один выход  $S$  и несколько входов – «синапсов», на которые поступают внешние воздействия (от рецепторов и других нейронов). Выходная функция (иногда ее называют передаточной функцией) будет выглядеть следующим образом:

$$Y_i = f\left(\sum_j C_{1,j} X_i + C_{0,j}\right), \quad (2)$$

В качестве функциональной зависимости в настоящее время используется т.н. логистическая функция вида:

$$Y_i = \frac{1}{1 + \exp(-K \cdot S)}, \quad (3)$$

где  $S = \sum(C_{ij} X_i + C_{0j})$ .

Для решения поставленной задачи этот подход обеспечивает универсальность поведения нейрона в сети при описании сложных нелинейных откликов системы на внешние воздействия. Благодаря универсальности логистической функции можно не беспокоиться о процессах, происходящих в нейронной сети и нейроне. Главная задача это генерация правильной конфигурации сети, способной адекватно описать поведенческие эталоны системы. Наиболее распространенной архитектурой является многослойная сеть с принципом связи «один со всеми».

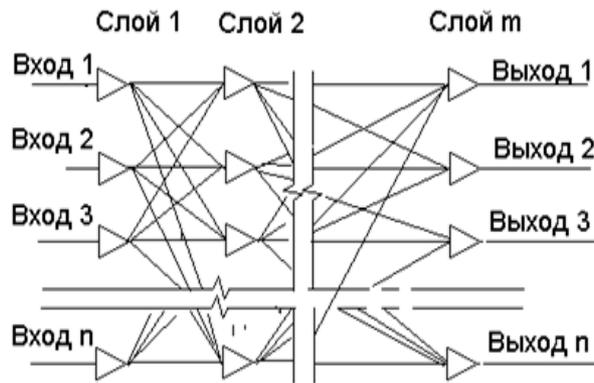


Рис. 1. Структура многослойной нейронной сети

Архитектура приведенной многослойной сети однозначно определяется матрицей весовых коэффициентов  $C$ , которая формируется при обучении нейронной сети. Обучение нейронной сети проводится по следующему алгоритму:

- путем экспертного анализа изменений контролируемых параметров была разработана таблица эталонных состояний наблюдаемого объекта – участка МН;
- для каждого эталонного состояния был определен коэффициент значимости
- для ранжирования состояний МН по степени опасности предполагаемых последствий;
- все элементы матрицы весовых коэффициентов  $C$  приравниваются к единице;
- для каждого эталонного состояния был определен коэффициент значимости
- для ранжирования состояний МН по степени опасности предполагаемых последствий;
- на входной слой нейросети подается комбинация входных сигналов, которая соответствует определенному состоянию участка МН;
- на выходном слое нейросети формируется сигнал (образ), представляющий собой одно из стандартных или эталонных состояний МН. Вполне естественно, что для начальных этапов обучения вероятность распознавания чрезвычайно низка и высока доля ошибок, для устранения которых используется метод «обратного распространения ошибки» [3];
- при «обратной прогонке» соответствующие элементы матрицы  $C$  для каждого слоя нейросети рассчитываются по выражению вида:

$$C_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left( C_i \cdot \frac{1}{(k-1)^2} \right), \quad (4)$$

где  $k$  - номер рассматриваемого нейрона в текущем слое.

При этом следует минимизировать число шагов "прямой" и "обратной" прогонки во избежание таких распространенных "вредных" явлений при обучении сети, как "паралич" сети, "ловушки локальных минимумов", "перетренировка" и т.д. [1]. В результате обучения формируется нейросеть с такими значениями матрицы  $C$ , которые по изменению входных контролируемых параметров позволяют распознать ситуации, возникающие при эксплуатации МН. Особенностью организации нейросетей является то, что

основная информация содержится не в самих нейронах, а в связях между нейронами - по аналогии с нервной системой биологических объектов.

Использование стандартных функциональных возможностей географических информационных систем (ГИС) позволяют в режиме реального времени представить информацию о существующих или возможных утечках нефтепродукта более наглядной и удобной для анализа и статистики пользователя. ГИС система переносит всю собранную информацию на карту местности, что позволяет контролировать состояние МН по средствам автоматизированного рабочего места (АРМ).

### **Заключение**

При функционировании нейросетей иногда может возникнуть неоднозначность, другими словами такая ситуация, когда при идентичных контролируемых сетью параметрах диагностируется несколько возможных состояний наблюдаемого объекта. В этом случае нейронная сеть выступает в качестве примитивной экспертной системы для лиц, принимающих решение или «советчика» обслуживающего персонала линейной диспетчерской службы и с учетом коэффициентов значимости ситуации выдавать рекомендации по управлению сложившейся ситуации для устранения нежелательного внешнего воздействия. Кроме этого, при наличии возможности ретроспективного обзора нейросеть может провести причинно-следственный статистический анализ для повышения точности и корректности выдаваемого результата. В последнем случае кроме диагностики состояния объекта контроля появляется возможность вероятностного прогнозирования дальнейшего развития критических и нестандартных ситуаций, возникающих при эксплуатации МН.

### **Список литературы**

1. Голицын Г.А., Фоминых И.Б. Интеграция нейросетевых технологий с экспертными системами // Труды 5 Национальной конференции по ИИ. – Казань 1996.
2. С.Е.Кутков. Проблема повышения чувствительности, надежности и быстродействия систем обнаружения утечек в нефтепроводах // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т.2. – С. 29 – 45.
3. Trelieven P. Neurocomputers. – L.: University College, 2011.

*Научное издание*

УПРАВЛЕНИЕ  
БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

*X Всероссийская школа-конференция молодых ученых*

5-7 июня 2013 года

*Материалы конференции*

ТОМ 3

Подписано в печать 28.05.2013. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 21,2. Уч.-изд. л. 21,1.

Тираж 120 экз. Заказ №

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный  
технический университет»

Редакционно-издательский комплекс УГАТУ

450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12